ТРУДЫ ГОРЬКОВСКОГО ИНСТИТУТА
ИНЖЕНЕРОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

ISSN 0371-7313

# ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

Выпуск [illegible]

Министерство речного флота РСФСР
Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
институт инженеров водного транспорта



# ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

Сборник научных трудов
Выпуск 223

Под редакцией доц., канд. техн. наук
В.А.Тронина

Горький
1987

УДК 656.62.05.86

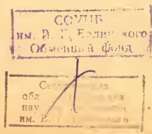
Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях. Вып.223

Выпуск посвящен исследованию проблемы обеспечения безопасности судоходства. Рассматриваются вопросы улучшения поворотливости катамаранных судов, точности радиолокационной проводки судов на прямолинейных участках и управления судами при прохождении поворотов речного русла. Предлагаются методы определения гидродинамических характеристик грузовых судов при произвольном плоском движении и обосновании частоты расстановки знаков при осевой системе ограждения. Исследуются вопросы оптимизации режима работы судоходных каналов и проектирования АСУ ТП "Канал".

Материалы выпуска представляют интерес для научных и практических работников в области судовождения и безопасности плавания, для студентов учебных заведений Минречфлота.







УДК 629.124.9.011.17-112

В.М.Бондарчик

# ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ПОВОРОТЛИВОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ КАТАМАРАННЫХ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

Представляет большой практический интерес проанализировать, насколько существующие типы катамаранных судов удовлетворяют требованиям норм управляемости, в частности, поворотливости и устойчивости на курсе. Согласно указанным нормам поворотливость судна характеризуется диаметром установившейся циркуляции $D_0$ центра тяжести судна на глубокой воде для случая полной загрузки при максимальной перекладке рулевых органов. При этом скорость ветра не должна превышать двух баллов по шкале Бофорта, а глубина должна удовлетворять одновременно двум условиям:

1) $T/H < 0,33$;

2) $v/\sqrt{gH} < \begin{cases} 0,6 \text{ для грузового флота;} \\ 0,7 \text{ для пассажирского флота.} \end{cases}$

Поворотливость судна считается обеспеченной при условии, если отношение диаметра циркуляции центра тяжести судна к длине судна равно или меньше двух.

В качестве критерия устойчивости судна на курсе принимается безразмерная угловая скорость судна $\Omega_0 = L/R_0$, где $R_0$ – радиус установившейся циркуляции центра тяжести судна с неотклоненным рулем. Судно считается удовлетворяющим требованиям, если $\Omega_0 \leqslant 0,2$.

Соответствие данных требований нормам управляемости у судов катамаранного типа может быть легко проанализировано по диаграммам управляемости. В табл.I приведены требования норм к поворотливости и устойчивости судов на курсе и результаты расчетов для катамаранных судов.

Таблица I

Расчет норм управляемости катамарана

| Проект | Поворотливость |  | Устойчивость |  |
|---|---|---|---|---|
|  | требование | расчет | требование | расчет |
| PI9 | $D_ц/L = 2$ | 5,33 | $\Omega_0 \leq 0,2$ | 0 |
| P80 |  | 4,73 |  | 0 |
| PI32 |  | 3,32 |  | 0,2 |

Как видно из табличных данных, у судов катамаранного типа обычно хорошая устойчивость на курсе, но, тем не менее, обыкновенные рули, установленные за открытыми винтами, которыми снабжены все построенные катамараны внутреннего плавания в нашей стране, не в состоянии обеспечить необходимую поворотливость.

Для улучшения поворотливости судов катамаранного типа могут быть предложены следующие меры.

I. Увеличение площади рулей катамарана. Мера увеличения площади рулей является обычно малоэффективной, поскольку при ограниченной осадке это увеличение возможно лишь в результате повышения его длины, что приводит к снижению относительного удлинения $\lambda_р$ и, как следствие, к падению коэффициента подъемной силы $\mu_р$ . Так, по дан-

ным В.М.Шмакова, увеличение площади рулей катамарана на 60% уменьшает диаметр циркуляции лишь на 10%, что явно недостаточно для удовлетворения норм управляемости.

2. Строительство катамаранов без кормовых стабилизаторов. Нами выполнен расчет диаграммы управляемости катамарана пр.Р19 с кормовым стабилизатором и без него. Сопоставление диаметров установившейся циркуляции катамарана данного проекта приведено в табл.2.

Таблица 2

Диаметры циркуляции катамарана пр. Р19

| Суда | $\alpha_р$, град | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 35 |
| С кормовыми стабилизаторами | 1200 | 723 | 547 | 496 |
| Без кормовых стабилизаторов | 454 | 362 | 314 | 298 |

Из табл.2 видно, что строительство катамаранов без кормовых стабилизаторов является весьма эффективной мерой улучшения их поворотливости, при предельном угле перекладки $\alpha_р = 35^0$ диаметр циркуляции уменьшается в 1,66 раза. В то же время эксплуатационная устойчивость на курсе с точки зрения норм управляемости остается допустимой ( $\Omega_0 = 1,19$).

Однако диаметр циркуляции при срезанном кормовом стабилизаторе (298 м) все еще существенно превышает требуемый нормами управляемости (186 м). Поэтому ликвидация кормовых стабилизаторов на речных катамаранах является совершенно необходимым, но недостаточным условием обеспечения их поворотливости.

3. Установка за гребными винтами многоперьевых комплексов (двойные и тройные рули Енкеля, тройные эксцентрические рули). Модельные и натурные испытания как изолированных многоперьевых комплексов, так и самоходных моделей проводились в ЧССР и в Советском Союзе (НИИВТ,ЛИВТ). Кроме того, тройные эксцентрические рули были установлены и испытаны на пассажирском теплоходе пр.839 и грузовом теплоходе пр.Р86; рулевые устройства были спроектированы в НИИВТе.

Испытания показали, что тройные рулевые комплексы обеспечивают судам весьма высокую поворотливость (диаметр циркуляции порядка 0,3 $L$ ); при этом судно становится теоретически устойчивым на курсе ($\Omega_0$ = 0). В настоящее время для улучшения поворотливости тройные эксцентрические рули установлены на вновь строящихся грузовых теплоходах пр.81110, а двойные рули Енкеля - на современных пассажирских судах пр.301.

Поскольку тройные рули создают добавочное сопротивление воды движению судна, то, по-видимому, для того, чтобы обеспечить необходимые требуемые нормы управляемости речных катамаранов, можно ограничиться применением двухперьевых рулей Енкеля при условии отсутствия кормовых стабилизаторов.

4. Применение в качестве движительно-рулевого комплекса (ДРК) винтовых поворотных колонок. Винтовые поворотные колонки получили широкое распространение за рубежом ("Шоттел", ФРГ, "Зетпеллер", Япония, "Аквамастер", Финляндия). Мощности, передаваемые на одну колонку, до-

стигают 2000 кВт. Этот вид ДРК способен сообщить судну идеальную поворотливость, поскольку сила упора может быть ориентирована в любом направлении. В то же время винтовые колонки обладают повышенным весом и стоимостью; наличие сложного механизма передачи вращения на винт снижает их живучесть. Кроме того, наличие массивной гондолы перед винтом снижает полезный упор последнего на 10-15%. Поэтому гидродинамические, эксплуатационные и экономические соображения заставляют нас воздержаться от рекомендации использования винтовых поворотных колонок в качестве ДРК катамаранов внутреннего плавания.

УДК 629.12:532.5

Ю.М.Кушнарев,
П.Н.Токарев

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСОВ СУДОВ

Практика судовождения, анкетный опрос судоводителей и анализ транспортных происшествий судов речного флота показывают, что наиболее трудные условия судовождения сложились на акваториях судоходных гидротехнических сооружений, крупных портов и рейдов, когда при значительном скоплении флота и стесненности габаритов пути судоводители вынуждены маневрировать на пониженных, а иногда и близких к нулю скоростях хода.

Для улучшения управляемости судна в этих условиях судоводители используют весь комплекс судовых средств управления, включая работу движителей с упорами в противоположных направлениях, главных рулевых и подруливающих устройств. Использование указанных режимов работы движителей и средств управления обеспечивает движение судна с углом дрейфа от 0 до $\pm 180^{\circ}$ и радиусом кривизны от 0 (вращение на месте) до $\infty$ (прямолинейное движение).

Для обеспечения безопасного маневрирования судов необходимо уметь рассчитывать характеристики маневров по надежной математической модели. При разработке такой модели нужно прежде всего знать усилия, действующие на корпус судна со стороны жидкости при выполнении того или иного маневра. Для определения усилий используются следующие выражения, вытекающие из теории подобия:

$$X_r = c_x (\rho/2) L T v^2;$$
$$Y_r = c_y (\rho/2) L T v^2; \qquad (1)$$
$$M_r = c_m (\rho/2) L^2 T v^2,$$

где $c_x, c_y$ – коэффициенты продольной и поперечной составляющей гидродинамической силы;

$c_m$ – коэффициент момента гидродинамической силы;

$\rho$ – плотность воды;

$L, T$ – длина и осадка судна;

$v$ – скорость движения судна.

На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что безразмерные коэффициенты $c_x, c_y, c_m$ зависят в основном от соотношений главных размерений судна, формы обводов корпуса, угла дрейфа, безразмерной угловой скорости вращения и, наконец, от чисел Фруда, Рейнольдса и Струхаля, влиянием которых при расчетах управляемости судна обычно пренебрегают.

Теоретическое определение коэффициентов $c_x, c_y, c_m$ представляет серьезные затруднения. Поэтому в настоящее время они определяются по результатам модельных испытаний либо в аэродинамической трубе, либо в опытовом бассейне. При составлении структуры выражений для определения $c_y$ и $c_m$ используется циркуляционно-отрывная теория крыла малого удлинения, развитая в работах К.К.Федяевского и Г.В.Соболева. Согласно данной теории можно записать

$$c_y = c_1\beta + c_2\bar{\omega} + c_3|\beta|\beta + c_4\beta\bar{\omega} + c_5\bar{\omega}^2 + \dots;$$
$$c_m = m_1\beta + m_2\bar{\omega} + m_3|\beta|\beta + m_4\beta\bar{\omega} + m_5\bar{\omega}^2 + \dots, \qquad (2)$$

где $\beta$ - угол дрейфа;

$\bar{\omega}$ - безразмерная угловая скорость поворота судна,

К настоящему времени имеется довольно большое количество методов расчета гидродинамических характеристик корпусов судов и толкаемых составов, полученных разными исследователями. В различных методах предложены зависимости для определения $c_y$ и $c_m$ по структуре выражения (2). Значения коэффициентов $c_i$ и $m_i$ представлены либо в графической форме, либо в виде аппроксимирующих зависимостей. Причем количество членов $c_i$ и $m_i$ ограничивается и выбираются основные, определяющие, по мнению исследователя, члены. Это в первую очередь обусловлено типом задачи, решаемой авторами, и имеющимися в их распоряжении экспериментальными материалами.

Анализ материалов по определению гидродинамических усилий показывает, что по структуре выражения (2) имеются следующие методы расчета: для речных грузовых судов [I,2] и пассажирских судов [3], толкаемых составов [4,5], морских транспортных [6] и рыбопромысловых судов [7]. Причем методы расчета для судов и составов речного флота учитывают и влияние ограниченной глубины фарватера.

Однако методы, предложенные по структуре выражения (2), пригодны для расчета управляемости при выполнении маневров с ограниченными значениями углов дрейфа и угловых скоростей поворота ( $\beta \leqslant 30^0$, $\bar{\omega} \leqslant I{,}3$).

При исследовании параметров циркуляционного или позиционного движения, характеризующихся большими углами дрейфа, в структуру выражений (2) вводятся тригонометрические

функции. Впервые такая зависимость для определения гидродинамических характеристик с учетом демпфирующих составляющих предложена А.В.Васильевым [8]. Расчет коэффициентов по указанному методу ведется пересчетом коэффициентов $c_i$ и $m_i$ с других методов. Структурная зависимость [8] определения коэффициентов $c_x, c_y, c_m$ была использована Г.И.Вагановым для нахождения гидродинамических коэффициентов толкаемых составов, где пересчет коэффициентов ведется с метода Л.М.Рыжова [9], который предложен по результатам систематических натурных испытаний толкаемых составов.

Подобные зависимости на основе систематических модельных испытаний получены Ю.М.Мастушкиным и Е.М.Шестерненко для судов рыбопромыслового флота [10], С.А.Васильевым для пассажирских судов речного флота [11]. Вместе с тем перечисленные методы, значительно расширив возможности определения гидродинамических усилий при расчете так называемых "сильных маневров", не позволяют осуществить переход к циркуляционному движению с радиусом циркуляции центра масс судна, стремящегося к нулю.

Единственным методом, позволяющим вести расчет гидродинамических усилий для произвольного плоского движения судна, в настоящее время является метод А.П.Тумашика [12]. Здесь дан другой способ представления безразмерной угловой скорости, допускающий предельный переход к случаю $R = 0$. Метод А.П.Тумашика предложен по результатам модельных испытаний морских судов серии Н.И.Анисимовой [13]. Используя аппроксимирующие выражения для определения $c_i$ и $m_i$, полученные И.П. Мелкозеровой [14], зависимости [12] можно применять при рас-

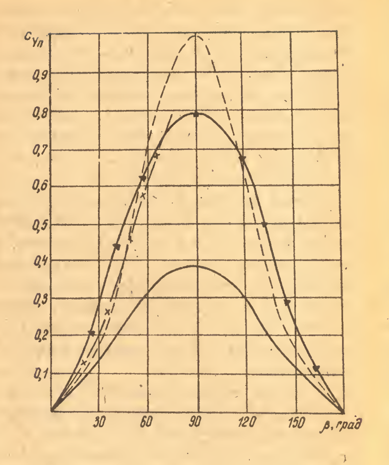



Рис.I. Зависимость коэффициента позиционной составляющей нормальной гидродинамической силы от угла дрейфа судна:
– – – – - расчет по [8]; —x— - расчет по [I];
——— - расчет по [I3]; —▲— - расчет по [I0]

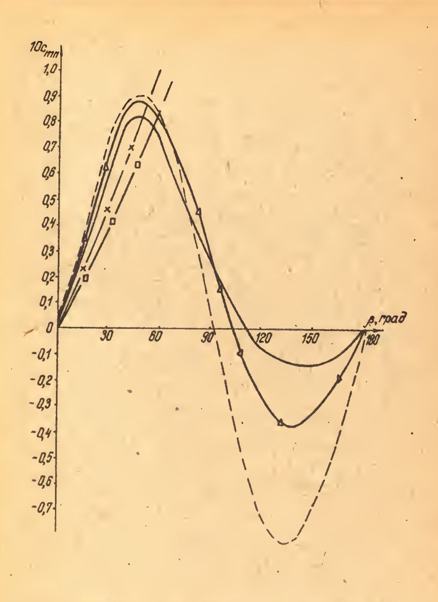



Рис.2. Зависимость позиционной составляющей гидродинамического момента от угла дрейфа судна:
— — — - расчет по [8]; —x— - расчет по [1]; —Δ— - расчет по [10]; ——— - расчет по [13]; —□— - расчет по [2]

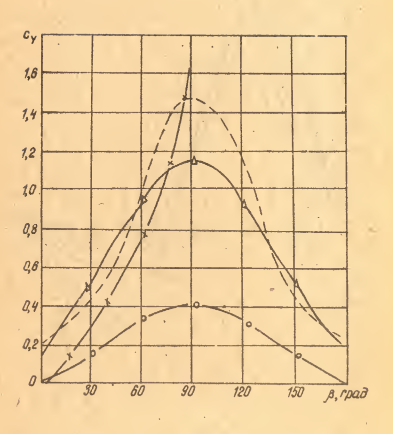



Рис.3. Зависимость коэффициента боковой составляющей гидродинамической силы от угла дрейфа судна при $\bar{\omega}$ = I:

---- расчет по [8]; —x—– расчет по [I];
—Δ—– расчет по [IO];—o—– расчет по [I2]

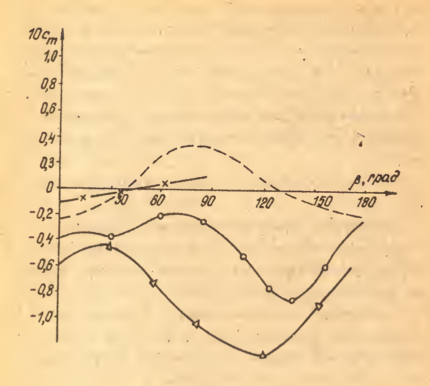



Рис.4. Зависимость коэффициента гидродинамического момента от угла дрейфа судна при $\bar{\omega}$ = I:
– – – – расчет по [8]; —×— – расчет по [I];
—△— – расчет по [I0]; —○— – расчет по [I2]

чете параметров движения судна с помощью ЭВМ.На рис.I-4 представлены зависимости коэффициентов $C_Y$ и $C_m$, рассчитанные для теплохода типа "Волго-Дон" по различным методам.Анализ полученных кривых показывает, что имеются существенные различия при определении коэффициентов. Использование метода А.П.Тумашика для расчета гидродинамических характеристик грузовых судов речного флота требует экспериментальной проверки.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

к настоящему времени отсутствует метод определения гидродинамических характеристик корпусов судов внутреннего плавания, позволяющий вести расчет гидродинамических усилий при выполнении произвольных маневров;

допустимость использования метода А.П.Тумашика для расчета гидродинамических усилий, возникающих на корпусе судна внутреннего плавания при произвольном плоском движении, требует экспериментальной проверки.

## Литература

I. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания.- Л.: Судостроение, 1971.- 168 с.

2. Павленко В.Г. Маневренные качества речных судов.- М.: Транспорт, 1979.- 183 с.

3. Павленко В.Г., Элис Е.Я. Метод определения гидродинамических характеристик речных пассажирских судов.- В кн.: Гидродинамика корабля.- Тр./НКИ, 1983, с.13-17.

4. Г о р д е е в  О.И., М у с т а ф и н  А.Н. Метод расчета гидродинамических усилий, действующих на толкаемые составы при их криволинейном движении на мелководье.- Тр./НИИВТ, 1972, вып.87, с.80-90.

5. В ь ю г о в  В.В., Д е р е в я н ч е н к о  Н.Т., М а н и н  В.М. Гидродинамические характеристики толкаемых составов.- В кн.: Движение судов и составов в речных условиях.- Тр./НИИВТ, 1985.- 154 с.

6. П е р ш и ц  Р.Я. Управляемость и управление судном.- Л.: Судостроение, 1983.- 272 с.

7. М а с т у ш к и н  Ю.М. Управляемость промысловых судов.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.-232 с.

8. В а с и л ь е в  А.В. Исследования циркуляционного движения при работе комплекса корпус судна - винты - движители на разных режимах.- Тр./ГИИВТ, 1967, вып.85, с.19-48.

9. Р ы ж о в  Л.М. Управляемость толкаемых составов.- М.: Транспорт, 1969.- 128 с.

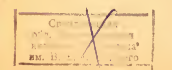
10. М а с т у ш к и н  Ю.М., Ш е с т е р е н к о  Е.М. Средства активного управления промысловыми судами. - М.: Агропромиздат, 1985.- 127 с.

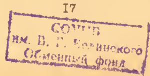
11. В а с и л ь е в  С.А., К р а с н о к у т с к а я  Н.А., П о я р к о в  В.А. Гидродинамические характеристики корпусов судов внутреннего плавания.- Тр./НТО им.акад. А.Н.Крылова, 1982, вып.363, с.16-23.

12. Т у м а ш и к  А.П. Расчет гидродинамических характеристик при маневрировании. -Судостроение, 1978, № 5, с.13-15.









13. А н и с и м о в а Н.И. Позиционные гидродинамические характеристики судов при произвольных углах дрейфа. – Судостроение, 1968, № 5, с.4-8.

14. Справочник по теории корабля. Т.3. Управляемость водоизмещающих судов / Под ред. Я.И.Войткунского.- Л.: Судостроение, 1985.- 249 с.

УДК 629.12:532.5 П.Н.Токарев

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА КОРПУСЕ ГРУЗОВОГО СУДНА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ПЛОСКОМ ДВИЖЕНИИ

Анализ причин транспортных происшествий, совершенных судами и составами при плавании по внутренним водным путям, показывает, что одним из необходимых условий безопасности плавания судов и снижения уровня аварийности является повышение качества судовождения. Особую актуальность данный вопрос приобретает при прохождении судами и составами участков пути, на которых судоводители вынуждены выполнять различные виды маневров на малых, а иногда и близких к нулю скоростях хода (привально-отвальные маневры, постановка на якорь, шлюзование). В этих условиях безопасность плавания судна (состава) во многом зависит от своевременных и уверенных действий судоводителя, основанных на точной оценке сложившейся ситуации с учетом путевых и гидрометеорологических условий, возможностей судовых средств управления и хорошего знания маневренных качеств судна.

Для улучшения управляемости судна при маневрировании на малых скоростях хода судоводитель использует весь комплекс судовых средств управления, включая работу движителей с упорами в противоположных направлениях.

Сочетание главных и вспомогательных средств управления дает возможность обеспечить движение судна на траектории произвольного радиуса кривизны с углами дрейфа от 0 до 180°. Для определения параметров произвольного движения,

кроме учета сил и моментов от внешних факторов (ветер, течение, мелководье), прежде всего необходимо знание сил и моментов, действующих на судно со стороны жидкости, рулевого органа и движителей, режим работы которых может изменяться от швартовного до ходового. Анализ существующих методов определения гидродинамических характеристик (ГДХ) судна показал, что к настоящему времени отсутствует метод определения ГДХ корпусов судов внутреннего плавания, позволяющий вести расчет гидродинамических сил и моментов во всем диапазоне изменения углов дрейфа и радиуса кривизны траектории, возникающих при маневрировании на малых скоростях хода.

В связи с этим в марте 1986 г. в прямом опытовом бассейне НИИВТа автором статьи совместно с сотрудниками НИИВТа были проведены испытания серии из 9 моделей грузовых судов. Программа испытаний охватывала практически все типы существующих грузовых судов внутреннего плавания. При испытании угол дрейфа варьировался от 0 до 180° с интервалом в 5°. В результате обработки материалов испытаний получены следующие выражения для определения позиционных составляющих ГДХ корпуса:

$$\left.\begin{aligned} c_{yп} &= c_1 \sin 2\beta \cos\beta + c_2 \sin^2\beta + c_3 \sin^4 2\beta; \\ c_{mп} &= m_1 \sin 2\beta + m_2 \sin\beta + m_3 \sin^3 2\beta + m_4 \sin^4 2\beta, \end{aligned}\right| \quad (1)$$

где $c_{yп}$ – коэффициент позиционной составляющей нормальной гидродинамической силы;

$c_{mп}$ – коэффициент позиционной составляющей момента;

$\beta$ – угол дрейфа.

Коэффициенты $c_i$ и $m_i$ определяются по следующим ап-

проксимационным выражениям:

$$
\begin{aligned}
&c_1 = 2,7(T/L);\\
&c_2 = 1,353 - 51,8(T/L) + 116,2(T/L - 0,07)^{1,3} - \left[0,16 + \right.\\
&\left. + 0,049\,th^{1,5}\,106,4(T/L - 0,01)\right] th\,0,55(B/T - 3);\\
&c_3 = 0,47(T/L);\\
&m_1 = \left[0,042 + 0,00174(L/B - 8,17)\right]\left[21(T/L) + 0,285\right];\\
&m_2 = \ln(1,03\sigma)\ /\ (11,6\sigma - 9,29);\\
&m_3 = 0,022 - 0,0063\sigma;\\
&m_4 = 4,3(T/L) - 72(T/L)^2 - 0,0094\sigma - 0,065,
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

где $L, B, T$ – длина, ширина и осадка судна;

$\sigma$ – коэффициент полноты кормовой части диаметральной плоскости судна, определяемый по рекомендациям [I].

Для расчетов параметров криволинейного движения судна необходимо знание ГДХ с учетом демпфирующих составляющих. Анализ имеющихся методов определения ГДХ показывает, что с достаточной для практических расчетов точностью гидродинамические коэффициенты могут быть найдены по следующим структурным выражениям:

$$
\begin{aligned}
&c_{xr} = c_{x0}(1 + 2,4\bar{\omega});\\
&c_{yr} = c_{yn} + c_4\bar{\omega} + c_5 \sin\beta\,\bar{\omega};
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

$$c_{mr} = c_{mn} + m_5 \bar{\omega} + m_6 \sin\beta \bar{\omega},$$

где $\bar{\omega} = L/R$ – кривизна траектории;

$R$ – радиус траектории движения;

$c_{xo}$ – коэффициент сопротивления воды движению корпуса судна на прямом курсе.

В выражении (3) демпфирующие составляющие могут быть определены по аппроксимационным формулам

$$\left.\begin{aligned} c_4 &= 0{,}02 + 0{,}37(\delta - 0{,}9) - 12(\delta - 0{,}9)^2; \\ c_5 &= 0{,}007 + 0{,}12\delta; \\ m_5 &= 0{,}011(B/T - 3)^{0,5} - 0{,}001(B/T - 3) - 0{,}3(T/L - 0{,}0237) - \\ &\quad - 0{,}03(\delta - 0{,}9) - 0{,}033; \\ m_6 &= 0{,}11(T/B) + 1{,}81(T/B - 0{,}15)^3 - 0{,}089, \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

полученным по результатам модельных испытаний, проведенных в ЛИВТе под руководством А.Д.Гофмана [2].

Из выражения (3) видно, что по мере роста $\bar{\omega}$, т.е. уменьшении радиуса кривизны до нуля, коэффициенты $c_{xr}, c_{yr}, c_{mr}$ будут стремиться к бесконечности. Для таких случаев по предложению А.П.Тумашика ГДХ удобно определять в зависимости от обобщенной кривизны траектории [I]:

$$\Omega = L/\sqrt{L^2 + R^2}. \qquad (5)$$

Можно показать, что кинематические параметры движения связаны с величиной $\Omega$ соотношением

$$\Omega = (\omega L)/\sqrt{\omega^2 L^2 + v^2}. \qquad (6)$$

Коэффициенты $c_i^* = f(\beta, \Omega)$ и $c_i = f(\beta, \bar{\omega})$ связаны между собой соотношением

$$c_i^* = c_i (1 - \Omega^2). \qquad (7)$$

При $R \to 0$ коэффициенты $c_i^*$ будут стремиться к значению коэффициентов вращения судна вокруг оси, проходящей через центр тяжести судна, которые могут быть определены по формулам Р.Я.Першица, полученным теоретическим путем:

$$\left.\begin{aligned}
&c_{xr.\,вр} = 0;\\
&c_{yr.\,вр} = 0{,}63 (c_2/\sigma)(1/8 - 1/\sigma_1^3);\\
&c_{mr.\,вр} = 0{,}473 (c_2/\sigma)(1/16 + 1/\sigma_1^4),
\end{aligned}\right| \qquad (8)$$

где $\sigma_1$ – безразмерный параметр формы диаметральной плоскости судна:

$$\sigma_1 = 1/(\sigma - 0{,}5). \qquad (9)$$

Выражая $\bar{\omega}$ через $\Omega$ и учитывая формулы (8), получим следующие зависимости для определения коэффициентов $c_i^*$:

$$\left.\begin{aligned}
&c_{xr}^* = c_{x0}\left[(1-\Omega^2) + 2{,}4\Omega\sqrt{1-\Omega^2}\right];\\
&c_{yr}^* = c_{yn}(1-\Omega^2) + (c_4 + c_5 \sin\beta)\Omega\sqrt{1-\Omega^2} + c_{yr.\,вр}\Omega^2;\\
&c_{mr}^* = c_{mn}(1-\Omega^2) + (m_5 + m_6 \sin\beta)\Omega\sqrt{1-\Omega^2} - c_{mr.\,вр}\Omega^2.
\end{aligned}\right| \qquad (10)$$

Тогда выражения для определения гидродинамических сил и момента через коэффициенты $c_i^*$ запишутся в следующем виде:

$$X_r = c_{x0}(\rho S_0/2)(v^2 + 2{,}4\omega L v);$$

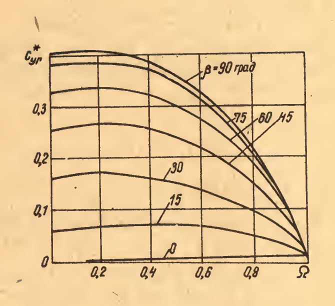



Рис.I. Зависимость коэффициента $c^*_{yr}$ от обобщенной кривизны траектории

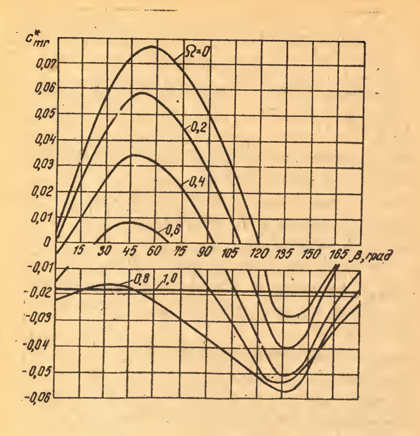



Рис.2. Зависимость коэффициента $c^*_{mr}$ от угла дрейфа и обобщенной кривизны траектории

$$Y_г = (\rho S_0/2)\left[c_{yп} \vartheta^2 + c_{yг.вр} \omega^2 L^2 + (c_4 + c_5 \sin\beta)\omega L \vartheta\right]; \qquad (11)$$

$$M_г = \left[(\rho S_0 L)/2\right]\left[c_{mп} \vartheta^2 - c_{mг.вр} \omega^2 L^2 + (m_5 + m_6 \sin\beta) \times \times \omega L \vartheta\right],$$

где $S_0$ – приведенная площадь погруженной части диаметральной плоскости судна;

$\vartheta$ – скорость движения центра тяжести судна;

$\omega$ – угловая скорость вращения судна;

$\rho$ – плотность воды.

На рис.I и 2 приведены зависимости коэффициентов $c^*_{yг}$ и $c^*_{mг}$ от угла дрейфа $\beta$ и обобщенной кривизны траектории $\Omega$, рассчитанные по выражениям (I0) для теплохода типа "Волго-Дон".

Полученные выражения для определения $X_г$, $Y_г$, $M_г$ справедливы при любых значениях $\beta$ и $\omega$ и могут быть использованы для нахождения сил и моментов при расчете параметров маневрирования в случае произвольного плоского движения грузового судна внутреннего плавания.

Литература

I. Справочник по теории корабля. Т.3. Управляемость водоизмещающих судов / Под ред.Я.И.Войткунского. – Л.:Судостроение, I985.– 249 с.

2. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания.– Л.: Судостроение, I97I.–I68 с.

УДК 656.62.052.4

В.И.Тихонов

# ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ ПРИ ПЕРЕХОДЕ С ПРЯМОГО КУРСА НА ПОВОРОТ ЗАДАННОГО РАДИУСА

Известно, что на речном флоте продолжает доминировать глазомерный (лоцманский) метод судовождения. Это обстоятельство обусловливается специфическими особенностями работы судов внутреннего плавания, которые характеризуются весьма стесненными габаритами судовых ходов, их извилистостью, требующей частого изменения курса, большой плотностью движения, наличием мостов, рейдов, переправ, осложняющих управление судами, значительным влиянием на движущиеся суда гидрометеорологических факторов и т.д.

Глазомерный метод был до последнего времени практически единственным методом судовождения и в условиях ограниченной видимости [I,2] .

Основой глазомерной проводки с использованием радиолокатора на внутренних водных путях являются знание маневренных качеств судна, технических возможностей судовой РЛС, специальной лоции района плавания, умение определять с помощью радиолокационных ориентиров границы судового хода и выбирать очередные направления движения судна.

Статистика транспортных происшествий в Волжском бассейне свидетельствует о том, что в условиях ограниченной видимости судоводители испытывают серьезные затруднения при проводке судов по криволинейным участкам.

Результаты натурных экспериментов, поставленных А.И. Голубевым [3] , показывают, что даже опытные капитаны при

глазомерной радиолокационной проводке по криволинейным участкам постоянно допускают ошибки в управлении судном, вследствие которых его боковые смещения с оси фарватера могут превышать половину ширины судового хода. Во время проведения экспериментов, как указывает А.И.Голубев [3, с.94], судно на каждом участке выходило за кромку судового хода, убавляло, а иногда вообще останавливало ход.

Изложенное свидетельствует о том, что глазомерный метод судовождения с использованием РЛС не обеспечивает безопасности плавания судов на криволинейных участках пути в условиях ограниченной видимости.

Анализ транспортных происшествий и результатов натурных экспериментов указывает на необходимость детального исследования вопросов управления судном при его движении по криволинейным трассам.

Теория маневрирования судна в произвольном сносящем потоке жидкости разработана в трудах В.Г.Павленко и Л.М. Витавера [4,5,6]. Система допущений, при которых ими получена общая математическая модель движения судна на течении, сводится к следующим основным положениям [5] :

1. Гидромеханические усилия, действующие на тело со стороны жидкости, включая усилия, вызываемые инерционностью жидкости, зависят от параметров относительного движения тела в жидкости таким же образом, как и от параметров абсолютного движения в покоящейся жидкости.

2. Линейная и угловая скорости переносного движения твердого тела в движущейся жидкости определяются из условия равенства количества движения и момента количества

движения твердого тела при переносном движении аналогичным величинам для движущейся жидкости в объеме, вытесненном телом, при отсутствии последнего и условии равенства плотностей жидкости и твердого тела (принцип "отвердения").

3. В состав действующих на тело усилий должны быть включены силы и моменты, равные по величине и противоположные по направлению силам и моментам сил инерции движущейся жидкости в объеме, вытесненном телом, при отсутствии последнего.

При нормировании габаритов и поворотливости речных судов и толкаемых составов практически всеми исследователями рассматривается установившееся движение по повороту речного русла постоянной кривизны [7,8,9]. Подобный подход к решению задач управления судном при проводке его по криволинейным речным участкам не может быть использован, поскольку такое движение имеет в общем случае неустановившийся характер. Для определения параметров управления судном возникает необходимость в составлении частной математической модели, приближенно описывающей неустановившееся движение судна при прохождении поворота реки.

На основе анализа русловых течений В.Г.Павленко [10] показано, что поворот реки приближенно можно рассматривать как часть кругового кольца с линиями тока в виде концентрических окружностей.

Исследуя путевые условия Единой глубоководной системы (ЕГС) Европейской части РСФСР, А.И.Голубев [11] сделал вывод о том, что ось судового хода на речных участках может быть аппроксимирована отрезками прямых линий и дугами ок-

ружностей.

Массированная вероятностно-статистическая обработка лоцманских карт большого числа свободных рек позволила Л.М.Витаверу, В.Г.Павленко и А.А.Рудневу [12] стандартизировать и математически описать форму оси судового хода на повороте реки. Анализ результатов исследований [12] свидетельствует о том, что, если угол поворота речного русла не превышает 100 град, то стандартная форма оси судового хода в границах поворота может быть представлена в виде двух отрезков прямых линий, являющихся продолжением осей разделенных поворотом прямолинейных участков, и сопряженной с этими отрезками дуги окружности.

Судя по результатам исследований, представленным в работе [11], на речных участках ЕГС угол поворота судового хода всегда меньше 100 град.

Таким образом, исходя из вышеизложенного и учитывая то обстоятельство, что при выходе на циркуляцию величина обратного бокового смещения ц.т. судна по сравнению с соответствующим ему мгновенным значением радиуса кривизны траектории пренебрежимо мала, для решения задач управления судном при прохождении криволинейных участков реки можно дополнительно к указанным сделать следующие допущения:

скорость течения постоянна по величине на оси судового хода и направлена по касательной к ней;

в поперечном сечении русла реки скорость течения меняется пропорционально расстоянию до мгновенного центра кривизны оси судового хода;

управление судном ведется так, что его ц.т. движется по криволинейной траектории, совпадающей с осью судового

хода.

Для описания такого движения судна на повороте реки введем две системы координат - подвижную и неподвижную, как это показано на рис.I. Согласно принятым допущениям проекции абсолютных линейной и угловой скоростей судна на подвижные оси определяются выражениями

$$\begin{aligned} U_1 &= v_x + c_x = v\cos\beta + c\cos\beta ; \\ U_2 &= v_y + c_y = -v\sin\beta - c\sin\beta ; \\ U_3 &= \omega + \omega_c = \omega + (c/R) , \end{aligned} \qquad (1)$$

где $v$ - линейная скорость судна относительно воды;

$c$ - скорость течения на оси судового хода (при движении вниз $c > 0$ );

$\beta$ - угол дрейфа судна по ц.т.;

$\omega$ - угловая скорость вращения судна относительно воды;

$\omega_c$ - угловая скорость течения;

$R$ - радиус кривизны судового хода в точке $G$ .

Из гидродинамики [I3] известно, что уравнения движения твердого тела в идеальной безграничной жидкости можно рассматривать как уравнения его движения в пустоте, если к векторам количества и момента количества движения прибавить соответственно векторы количества и момента количества движения присоединенных масс жидкости. Следовательно, уравнения движения судна в векторной форме запишутся так:

$$\begin{aligned} d_a \vec{K} / dt &= \vec{F} ; \\ d_a \vec{L} / dt &= \vec{M} . \end{aligned} \qquad (2)$$

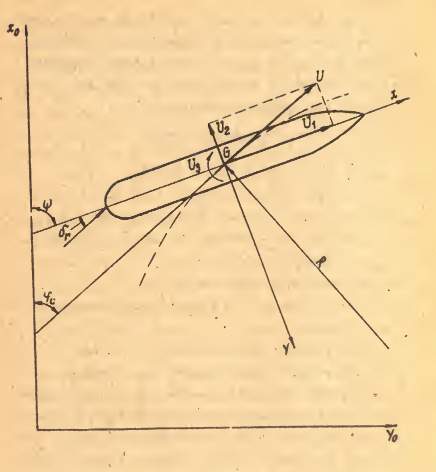



Рис.I. Кинематические параметры движения судна на повороте реки

Здесь $d_a/dt$ – символ абсолютной производной по времени (дифференцирования в неподвижной системе координат);

$\vec{K}$ – вектор количества движения системы судно – жидкость;

$\vec{F}$ – главный вектор внешних сил, приложенных к судну;

$\vec{L}$ – вектор момента количества движения системы;

$\vec{M}$ – вектор главного момента внешних сил.

Дифференциалы $d_a\vec{K}$ и $d_a\vec{L}$ с учетом изменения величин $\vec{K}$ и $\vec{L}$ за время $dt$ относительно неподвижной системы координат, как показано в работе [14], определяются выражениями

$$d_a\vec{K} = d\vec{K} + \vec{U}_3 dt \times \vec{K};$$
$$d_a\vec{L} = d\vec{L} + \vec{U}_3 dt \times \vec{L} + \vec{U} dt \times \vec{K}. \tag{3}$$

Подставляя выражения (3) в (2), получаем полную векторную форму уравнений движения судна:

$$(d\vec{K}/dt) + \vec{U}_3 \times \vec{K} = \vec{F};$$
$$(d\vec{L}/dt) + \vec{U}_3 \times \vec{L} + \vec{U} \times \vec{K} = \vec{M}. \tag{4}$$

В проекциях на подвижные оси уравнения (4) примут вид

$$(dK_x/dt) - K_y U_3 = X;$$
$$(dK_y/dt) + K_x U_3 = Y;$$
$$(dL_z/dt) + K_y U_1 - K_x U_2 = M_z. \tag{5}$$

Величины $K_x$, $K_y$ и $L_z$ определяются по известным из механики формулам

$$K_x = \partial T_S / \partial U_1 \; ; \; K_y = \partial T_S / \partial U_2 \; ; \; L_z = \partial T_S / \partial U_3 \; . \qquad (6)$$

Кинетическая энергия системы судно - жидкость согласно первому из основных допущений может быть представлена следующим образом:

$$T_S = 0{,}5(mU_1^2 + mU_2^2 + J_z U_3^2) + 0{,}5\left[\lambda_{11}(U_1 - c_x)^2 + \right.$$
$$\left. + \lambda_{22}(U_2 - c_y)^2 + \lambda_{66}(U_3 - \omega_c)^2\right] + \lambda_{26}(U_2 - c_y) \times$$
$$\times (U_3 - \omega_c) \, , \qquad (7)$$

где $m$ - масса судна;

$J_z$ - момент инерции массы судна относительно вертикальной оси, проходящей через его ц.т.;

$\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{26}, \lambda_{66}$ - присоединенные массы жидкости.

Выражение (7) составлено с учетом того обстоятельства, что в состав кинетической энергии жидкости следует включать, как показано в работе [4], лишь энергию возмущений, вносимых в жидкость движущимся судном. Кроме того, принято, что судно симметрично относительно ДП.

Подставляя значение кинетической энергии $T_S$ в формулы (6), преобразуем уравнения (5) к виду

$$\left.\begin{aligned} & m(dU_1/dt) + \lambda_{11}(dv_x/dt) - mU_2U_3 - \lambda_{22}v_y\omega - \lambda_{26}\omega^2 = X; \\ & m(dU_2/dt) + \lambda_{22}(dv_y/dt) + mU_1U_3 + \lambda_{11}v_x\omega + \lambda_{26}(d\omega/dt) = Y; \\ & J_z(dU_3/dt) + \lambda_{66}(d\omega/dt) + (\lambda_{22} - \lambda_{11})v_xv_y + \lambda_{26}v_x\omega + \lambda_{26}(dv_y/dt) = M_z. \end{aligned}\right| (8)$$

При составлении уравнений (8) учтено, что усилия, вызываемые инерционностью присоединенных масс жидкости, зависят согласн⟩ первому из основных допущений лишь от параметров движения судна относительно воды.

На основании третьего из основных допущений, как следует из работы [6], в состав сил неинерционной природы необходимо включить усилия инерционного происхождения

$$X_C = -mc_y\omega_C ; \quad Y_C = mc_x\omega_C ; \quad M_C = 0. \tag{9}$$

Величина радиуса кривизны судового хода в точке $G$ согласно последнему из дополнительных допущений равна мгновенному значению радиуса кривизны траектории ц.т. судна. Следовательно,

$$\omega_C = c/R = (c/v)(\omega - d\beta/dt). \tag{10}$$

Подставляя формулы (I), (9) и (I0) в уравнения (8), получаем

$$\left.\begin{aligned}
&(m+\lambda_{11})(dv/dt)\cos\beta - [m+\lambda_{11}+2m(c/\lambda)]v\sin\beta(d\beta/dt) + \\
&+[m+\lambda_{22}+2m(c/v)]v\omega\sin\beta - \lambda_{26}\omega^2 = X; \\
&-(m+\lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta - [m+\lambda_{22}+2m(c/v)]v\cos\beta\times \\
&\times(d\beta/dt) + [m+\lambda_{11}+2m(c/v)]v\omega\cos\beta + \lambda_{26}(d\omega/dt) = Y; \\
&[J_z+\lambda_{66}+J_z(c/v)](d\omega/dt) + J_z[(c/v^2)(d\beta/dt)(dv/dt) - \\
&-(c/v)(d^2\beta/dt^2) - (c\omega/v^2)(dv/dt)] - (\lambda_{22}-\lambda_{11})v^2\times \\
&\times\sin\beta\cos\beta + \lambda_{26}[v\omega\cos\beta - \sin\beta(dv/dt) - v\cos\beta\times \\
&\times(d\beta/dt)] = M_z.
\end{aligned}\right| \tag{11}$$

Присоединенные массы $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ и $\lambda_{66}$ определяются выражениями

$$\lambda_{11} = k_{11} m; \quad \lambda_{22} = k_{22} m; \quad \lambda_{66} = k_{66} J_z , \qquad (12)$$

а присоединенный статический момент $\lambda_{26}$, обусловленный несимметрией корпуса судна относительно плоскости $yGz$, мал по величине, поэтому в расчетах управляемости одиночных речных судов члены, содержащие $\lambda_{26}$, в уравнениях опускают. Учитывая ту степень точности, с которой определяются все величины, входящие в уравнения движения судна, из-за малости можно пренебречь и вторым слагаемым в левой части последнего уравнения системы (II).

Заметим, что при экспериментальной оценке гидродинамических характеристик корпуса судна определяются не усилия неинерционной природы, а суммарные гидродинамические силы и моменты, приложенные к модели, в состав которых входят усилия, обусловленные инерционностью присоединенных масс жидкости. Кроме этого, приняв во внимание тот факт, что даже на лимитирующих поворотах угол дрейфа $\beta$ практически не превышает 20°, положим $\sin\beta \approx \beta$ и $\cos\beta \approx 1$.

Выразим кинематические параметры движения судна $v, \omega$ и время $t$ через безразмерные характеристики $\theta, \Omega$ и безразмерное время $\tau$ :

$$v = \theta v_0 ; \; \omega = \Omega (v/L) = \Omega\theta (v_0 /L) ; \; t = \tau (L/v_0) . \qquad (13)$$

Здесь $v_0$ - скорость прямолинейного движения судна относительно воды перед началом маневра;

$L$ - длина судна.

Подставляя формулы (I2), (I3) в уравнения (II) и рас-

крывая значения величин $X, Y$ и $M_z$, получаем

$$\begin{aligned}
&\bar{m}(1+k_{11})(d\theta/d\tau)-\bar{m}\left[1+k_{11}+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta\beta(d\beta/d\tau)+\\
&+\bar{m}\left[1+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta^2\Omega\beta=\bar{\sigma}-c_{xk}\theta^2;\\
&-\bar{m}(1+k_{22})\beta(d\theta/d\tau)-\bar{m}\left[1+k_{22}+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta(d\beta/d\tau)+\\
&+\bar{m}\left[1+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta^2\Omega=c_{yk}\theta^2-E\left[\delta_r-\varkappa_r(\beta+\chi\Omega)\right]\theta^2;\\
&\bar{J}\left[1+k_{66}+(\bar{c}/\theta)\right]\theta(d\Omega/d\tau)+\bar{J}\left[1+k_{66}+(\bar{c}/\theta)\right]\Omega\times\\
&\times(d\theta/d\tau)=c_{mk}\theta^2+\chi E\left[\delta_r-\varkappa_r(\beta+\chi\Omega)\right]\theta^2.
\end{aligned} \quad (14)$$

В выражениях (I4) приняты следующие обозначения:

$$\bar{m}=(2m)/(\rho L^2 T);\quad \bar{J}=(2J_z)/(\rho L^4 T);$$

$$\bar{c}=c/v_0,$$

где $\rho$ - плотность воды;

$T$ - осадка судна.

Величины $\bar{m}$ и $\bar{J}$ называют соответственно безразмерной массой и безразмерным моментом инерции судна, $\bar{\sigma}$ - безразмерной продольной силой ДРК, $E$ - эффективностью рулевых органов судна, $\chi$ - безразмерным отстоянием ДРК от ц.т. судна, $c_{xk}, c_{yk}, c_{mk}$ - безразмерными коэффициентами сил и момента.

В соответствии с принятыми допущениями кинематические параметры $\beta$ и $\Omega$ в абсолютном и относительном движениях совпадают [7]. Следовательно, усилия неинерционной природы, возникающие на корпусе судна и его ДРК, зависят от параметров движения на повороте реки $\beta$, $\Omega$ и $\theta$ таким же

образом, как и при циркуляции на спокойной воде. Тогда согласно гипотезе стационарности правая часть первого уравнения системы (I4) может быть аппроксимирована следующим образом:

$$\bar{\sigma} - c_{xк}\,\theta^2 = a_x\,(\theta - \theta^2), \tag{15}$$

где $a_x$ – коэффициент аппроксимации.

С учетом равенства (I5) выражения (I4) примут вид

$$\left.\begin{aligned}
&\bar{m}(1+k_{11})(d\theta/d\tau) - \bar{m}\left[1+k_{11}+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta\beta(d\beta/d\tau)+\\
&+\bar{m}\left[1+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta^2\Omega\beta = a_x(\theta-\theta^2);\\
&-\bar{m}(1+k_{22})\beta(d\theta/d\tau) - \bar{m}\left[1+k_{22}+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta(d\beta/d\tau)+\\
&+\bar{m}\left[1+2(\bar{c}/\theta)\right]\theta^2\Omega = c_{yк}\,\theta^2 - E\left[\delta_r - æ_r(\beta+\chi\Omega)\right]\theta^2;\\
&\bar{J}\left[1+k_{66}+(\bar{c}/\theta)\right]\theta(d\Omega/d\tau) + \bar{J}\left[1+k_{66}+(\bar{c}/\theta)\right]\Omega\times\\
&\times(d\theta/d\tau) = c_{mк}\,\theta^2 + \chi E\left[\delta_r - æ_r(\beta+\chi\Omega)\right]\theta^2.
\end{aligned}\right| \tag{16}$$

Уравнения (I6) существенно нелинейны, поэтому решение их производится численным методом (методом Рунге-Кутта), для чего они преобразуются относительно производных $d\theta/d\tau$, $d\beta/d\tau$ и $d\Omega/d\tau$. Общая система уравнений для определения параметров движения судна на повороте реки будет выглядеть так:

$$\left.\begin{aligned}
&(d\theta/d\tau) = (A_2 m_1'\beta - A_1 m_2')/(m_1 m_2' + m_2 m_1'\beta^2);\\
&(d\beta/d\tau) = (A_1 m_2\beta + A_2 m_1)/(m_1 m_2' + m_2 m_1'\beta^2)\theta;
\end{aligned}\right|$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&(d\Omega / d\tau) = A_3 / (m_3'\theta) - (A_2 m_1' \beta - A_1 m_2')\Omega / (m_1 m_2' + \\
&+ m_2 m_1' \beta^2)\theta ; \\
&(d\psi / d\tau) = (\theta + \bar{c})\Omega - (\bar{c} / \theta)(d\beta / d\tau); \\
&\varphi_c = \psi - \beta ; \\
&(d x_0 / d\tau) = L(\theta + \bar{c}) \cos\varphi_c ; \\
&(d y_0 / d\tau) = L(\theta + \bar{c}) \sin\varphi_c .
\end{aligned}
\right\} \quad (17)
$$

Здесь

$$
m_1 = \bar{m}(1 + k_{11}); \; m_1' = \bar{m}[1 + k_{11} + 2(\bar{c}/\theta)]; \; m_2 = \bar{m}(1 + k_{22}); \; m_2' = \bar{m}[1 + k_{22} + 2(\bar{c}/\theta)]; \; m_3' = \bar{J}[1 + k_{66} + (\bar{c}/\theta)];
$$

$$
m_0 = \bar{m}[1 + 2(\bar{c}/\theta)]; \; A_1 = m_0 \theta^2 \Omega \beta - a_x(\theta - \theta^2);
$$

$$
A_2 = m_0 \theta^2 \Omega + E[\delta_r - æ_r(\beta + \chi\Omega)]\theta^2 - c_{yк}\theta^2;
$$

$$
A_3 = \chi E[\delta_r - æ_r(\beta + \chi\Omega)]\theta^2 + c_{mк}\theta^2.
$$

Система уравнений (I7) представляет собой частную математическую модель неустановившегося движэния судна на повороте реки, приведенную к расчетному виду.

Для проводки судна по криволинейному участку пути судоводитель заблаговременно путем соответствующих перекладок органа управления задает судну необходимую угловую скорость вращения с таким расчетом, чтобы траектория его движения совпадала или в общем случае была параллельна оси судового хода. Следовательно, при прохождении поворота судоводитель стремится выдержать постоянным значение кривизны траектории движения судна. Ввиду этого одной из

задач обеспечения безопасности плавания, с которой на внутренних водных путях судоводитель сталкивается постоянно, является задача о том, как перекладывать рулевой орган и когда начинать маневрирование, чтобы судно пошло по заданной круговой траектории.

Приближенное решение данной задачи излагается ниже. Предположим, что судоводитель, перекладывая рулевой орган в сторону поворота в течение времени $\tau_1$, а затем – в противоположную сторону в течение времени $\tau_2$, добился того, что $dR/d\tau \geq 0$.

Мгновенное значение радиуса кривизны траектории движения ц.т. судна рассчитывается по формуле

$$R = L / [\Omega - (1/\theta)(d\beta/d\tau)]. \tag{18}$$

При переводе судна с прямого курса на поворот угол дрейфа $\beta$ в период перекладок руля всегда меньше величины $\beta_R$ (угол дрейфа при установившемся движении на повороте радиуса $R$). Тогда необходимым условием решения поставленной задачи будет $d\beta/d\tau \geqslant 0$, так как в случае $d\beta/d\tau < 0$ задача потеряет физический смысл.

Функция $R(\tau)$ является убывающей, причем в конце второго этапа перекладки рулевого органа уменьшение радиуса кривизны траектории происходит вследствие того, что

$$|d\Omega/d\tau| < |(d/d\tau)[(1/\theta)(d\beta/d\tau)]|. \tag{19}$$

Отсюда очевидно, что условие $dR/d\tau = 0$ будет выполнено лишь в тот момент, когда

$$d\beta/d\tau = 0. \tag{20}$$

Таким образом, в момент времени $\tau = \tau_1 + \tau_2$ судно находится на окружности радиуса $R$ и имеет угол скорости $\varphi_C = \psi - \beta$.

Продольное смещение $x_0$ на этот момент времени может быть представлено следующим образом:

$$x_0 = D_n + R \sin\varphi_C \qquad (21)$$

где $D_n$ – дистанция упреждения начала маневрирования при переводе судна с прямого курса на поворот радиуса $R$.

Имея значения $x_0, R$ и $\varphi_C$ на момент времени $\tau = \tau_1 + \tau_2$, определяем величину дистанции упреждения

$$D_n = x_0 - R \sin\varphi_C . \qquad (22)$$

Следовательно, задаваясь временем $\tau_1$ при известных начальных условиях $\theta = 1$, $\beta = \Omega = x_0 = y_0 = \delta_r = 0$ и определяя время $\tau_2$, при котором будет выполнено условие (20), получаем строго соответствующие значениям радиусов поворотов параметры управления судном: дистанцию упреждения $D_n$, угол перекладки органа управления в сторону поворота $\delta_n$ и угол перекладки в противоположную повороту сторону $\delta_n'$

$$\left.\begin{aligned} \delta_n &= \Omega_r \tau_1 ; \\ \delta_n' &= \delta_n - \Omega_r \tau_2 . \end{aligned}\right| \qquad (23)$$

Если $\tau_1$ окажется больше времени перекладки рулевого органа на борт $\tau_r$, то

$$\left.\begin{aligned} \delta_n &= \delta_{max} ; \\ t_з^n &= L(\tau_1 - \tau_r)/v_0 , \end{aligned}\right| \qquad (24)$$

где $t_з^п$ – время задержки органа управления в положении $\delta_{max}$.

В дальнейшем рулевой орган перекладывается с таким расчетом, чтобы при $R = const$ постоянно выполнялось равенство

$$\Omega = (L/R) + (1/\theta)(d\beta/d\tau) \qquad (25)$$

Тогда

$$d\varphi_c/d\tau = d\psi/d\tau - d\beta/d\tau = (\theta + \bar{c})(L/R),$$

т.е. судно будет перемещаться по круговой траектории радиуса $R$.

Подставляя выражение (25) в уравнения (I6), получаем

$$\begin{aligned}
&(d^2\theta/d\tau^2) = (\bar{m}k_{11}/m_1)\theta\beta(d^2\beta/d\tau^2) + (\bar{m}k_{11}/m_1)\times \\
&\times\left[\beta(d\theta/d\tau) + \theta(d\beta/d\tau) - (m_0/\bar{m}k_{11})(L/R)\theta^2\right)\times \\
&\times(d\beta/d\tau) - (1/m_1)\left\{\left[(\bar{m}+m_0)(L/R)\beta + 2a_x\right]\theta - a_x\right\}\times \\
&\times(d\theta/d\tau); \\
&(d^2\beta/d\tau^2) = (\chi/m_3')\left[c_{yк} + (c_{mк}/\chi) - m_0(L/R)\right]\theta^2 - \\
&-\left[(L/R) - (\chi m_2/m_3')\beta\right](d\theta/d\tau) + \left[(\chi\bar{m}k_{22})/m_3'\right]\times \\
&\times\theta(d\beta/d\tau); \\
&\delta_r = (c_{yк}/E) + \left[æ_r\chi - (m_0/E)\right](L/R) + æ_r\beta + \\
&+(m_2/E\theta^2)(d\theta/d\tau) + \left[(\bar{m}k_{22})/(F\theta) + (æ_r\chi)/\theta\right]\times \\
&\times(d\beta/d\tau).
\end{aligned} \qquad (26)$$

Решая уравнения (26) с учетом равенства (25), определяем характер перекладки органа управления в процессе прохождения поворота.

На основании анализа результатов расчетов и натурных испытаний судоводителям можно рекомендовать сразу же переводить рулевой орган из положения $\delta_{п}'$ в положение $\delta_{R}$ (угол перекладки руля при установившемся движении на повороте реки с радиусом $R$ ) и в дальнейшем корректировать, если потребуется, траекторию движения судна, сообразуясь с окружающей обстановкой.

По изложенной в данной статье методике для теплохода пр.1565 выполнен предварительный расчет характера перекладки органа управления $\delta_{п}$, $t_{з}''$, $\delta_{п}'$, $\delta_{R}$ и дистанции упреждения $D_{п}$ в зависимости от величины радиуса поворота $R$ (результаты расчета для случая движения полным ходом на глубокой спокойной воде представлены в табл.1), а в 1984-1985 гг. проведены натурные испытания судов данного типа в озерной части Горьковского водохранилища.

Целью эксперимента была проверка соответствия расчетных (состоящих из отрезка $D_{п}$ и окружности радиуса $R$ ) - действительных (полученных в процессе испытаний) траекторий движения теплохода при переходе с прямого курса на поворот заданного радиуса.

Во время испытаний суда выводились на циркуляции различных радиусов (от 300 до 700 м) путем перекладки рулевого органа из нулевого положения на расчетные углы $\delta_{п}$, $\delta_{п}'$ и $\delta_{R}$, как показано на рис.2, а траектории движения определялись с помощью теодолитов методом подвижного базиса.

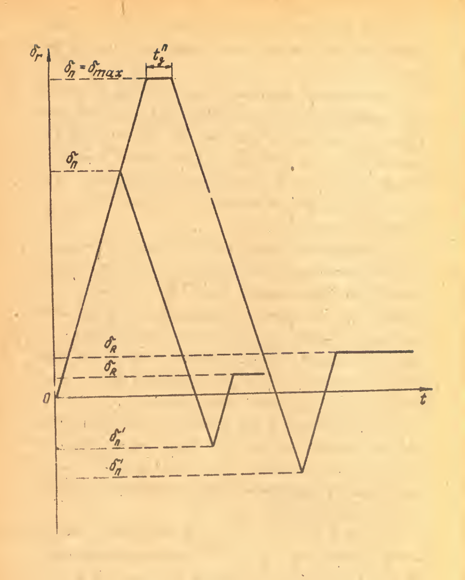



Рис.2. Характер перекладки рулевого органа при переводе судна с прямого курса на поворот заданного радиуса

Таблица I

Зависимость параметров управления теплоходом пр.I565 от величины радиуса поворота

| $R$, м | $D_n$, м | $\delta_n$, град | $t_y^n$, с | $\delta_n'$, град | $\delta_R$, град |
|---|---|---|---|---|---|
| 300 | I20 | 35,0 | 2,0 | − 6,5 | 6,5 |
| 400 | II5 | 33,5 | 0,0 | − 8,5 | 3,4 |
| 500 | II0 | 30,0 | 0,0 | − 9,5 | I,8 |
| 600 | I06 | 27,5 | 0,0 | −I0,0 | 0,9 |
| 700 | I02 | 25,5 | 0,0 | −I0,0 | 0,3 |
| 800 | 99 | 24,0 | 0,0 | −I0,0 | −0,I |
| 900 | 97 | 22,5 | 0,0 | − 9,5 | −0,3 |
| I000 | 95 | 2I,0 | 0,0 | − 9,0 | −0,5 |
| II00 | 93 | 20,0 | 0,0 | − 9,0 | −0,6 |
| I200 | 9I | I9,0 | 0,0 | − 8,5 | −0,7 |
| I300 | 88 | I8,0 | 0,0 | − 8,5 | −0,8 |
| I400 | 86 | I7,5 | 0,0 | − 8,0 | −0,8 |
| I500 | 84 | I7,0 | 0,0 | − 8,0 | −0,8 |

Обработка натурных наблюдений позволила сделать следующий вывод: различия между действительными и расчетными траекториями движения судов не выходят за пределы точности постановки эксперимента, поскольку максимальное расхождение для радиусов циркуляций составило ±8%, а для дистанций упреждения − ±9%.

Хорошее соответствие расчетных данных результатам эксперимента дает возможность рекомендовать предложенную методику определения параметров управления судном при разра-

ботке справочных пособий, которые могут оказать помощь судоводителям в повышении безопасности плавания на криволинейных участках внутренних водных путей.

## Литература

1. Бухановский И.Л. Радиолокационные методы судовождения.- М.: Транспорт, 1970.- 246 с.

2. Честнов Е.И., Голубев А.И. Использование радиолокаторов на реке.- М.: Транспорт, 1969.-133 с.

3. Голубев А.И. Радиолокационные методы судовождения на внутренних водных путях.- М.: Транспорт, 1987.- 143 с.

4. Павленко В.Г., Витавер Л.М. О движении твердого тела в сносящем потоке идеальной жидкости.- Тр./ НИИВТ, 1976, вып.105, с.5-24.

5. Павленко В.Г., Витавер Л.М. Приближенная теория движения твердого тела в установившемся потоке однородной несжимаемой жидкости.- В сб.: Совершенствование ходовых и маневренных качеств судов.- Новосибирск: Изд. НИИВТа, 1984, с.8-25.

6. Витавер Л.М., Павленко В.Г. Общие уравнения движения судна на течении.- В сб.: Совершенствование ходовых и маневренных качеств судов.- Новосибирск: Изд. НИИВТа, 1984, с.25-39.

7. Павленко В.Г. Элементы теории судовождения на внутренних водных путях. Ч.П.- М.: Транспорт, 1964. - 120 с.

8. Ваганов Г.И. Эксплуатация секционных соста-

вов.- М.: Транспорт, 1974.- 192 с.

9. Инструкция по нормированию габаритов судов и толкаемых составов. МРФ РСФСР. - Горький: Изд. ГИИВТа,1980.- 38 с.

10. Павленко В.Г. Элементы теории судовождения на внутренних водных путях. Ч.1.- Л.: Транспорт, 1962.- 103 с.

11. Голубев А.И., Глазова Н.В., Майлисов Е.М. Исследование путевых условий плавания судов по Единой глубоководной системе Европейской части РСФСР.- Тр./ ГИИВТ, 1982, вып.191, с.99-108.

12. Витавер Л.М., Павленко В.Г., Руднев А.А. К математической модели движения судов на повороте реки.- В сб.: Движение судов и составов в речных условиях. - Новосибирск: Изд. НИИВТа, 1985, с.121-127.

13. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна.- Л.: Речной транспорт, 1961.- 684 с.

14. Павленко В.Г. Маневренные качества речных судов.- М.: Транспорт, 1979.- 184 с.

УДК 656.62.052.4

В.И.Тихонов

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ ПРИ ПЕРЕХОДЕ С ПОВОРОТА ЗАДАННОГО РАДИУСА НА ПРЯМОЙ КУРС

Интенсивное развитие судоходства, вызванное потребностями народного хозяйства, все больше увеличивает загруженность внутренних водных путей. Рост числа судов и их габаритов ведет к заметной стесненности плавания. Все это предъявляет повышенные требования к качеству судовождения, т.е. обеспечению движения судна с возможно наименьшими отклонениями от заданной траектории.

Наибольшее затруднение, как известно, вызывает точный перевод судна с одной траектории движения на другую, ибо в этом случае судоводитель сталкивается со следующей задачей: как перекладывать орган управления и когда начинать маневрирование.

В данной статье предлагается способ приближенного решения поставленной задачи для случая перевода судна с поворота заданного радиуса на прямой курс.

Частная математическая модель неустановившегося движения судна на повороте реки при допущениях, принятых В.Г. Павленко и Л.М.Витавером [I], может быть представлена следующей системой уравнений [2]:

$$d\vartheta/d\tau = (A_2 m_1' \beta - A_1 m_2')/(m_1 m_2' + m_2 m_1' \beta^2);$$

$$d\beta/d\tau = (A_1 m_2 \beta + A_2 m_1)/[(m_1 m_2' + m_2 m_1' \beta^2)\theta;$$

$$d\Omega/d\tau = A_3/(m_3'\theta) - [(A_2 m_1'\beta - A_1 m_2')\Omega]/[(m_1 \times m_2' + m_2 m_1' \beta^2)\theta]; \quad (1)$$

$$d\psi/d\tau = (\theta + \bar{c})\Omega - (\bar{c}/\theta)(d\beta/d\tau).$$

При выводе судна с поворота на прямой курс судоводителю необходимо заблаговременно путем соответствующих перекладок рулевого органа погасить инерцию вращения, одержать судно. Следовательно, одной из задач обеспечения безопасности плавания, стоящих пере судоводителем на внутренних водных путях, является задача о том, как перекладывать орган управления и когда начинать маневрирование, чтобы перевести судно с круговой траектории движения на прямолинейную.

Приближенное решение такой задачи излагается ниже. Предположим, что судоводитель, перекладывая рулевой орган в противоположную повороту сторону в течение времени $\tau_1$, а затем – в сторону поворота в течение времени $\tau_2$, добился того, что $dR/d\tau = 0$. Тогда в момент окончания второго этапа перекладки руля

$$d\beta/d\tau = 0 \quad (2)$$

и

$$R' = L/\Omega, \quad (3)$$

т.е. в общем случае получается переход судна с круговой тра-

ектории радиуса $R$ на траекторию радиуса $R'$. Следовательно, задавая время $\tau_1$ и рассчитывая соответствующую условию (2) величину времени $\tau_2$, можно найти такие значения этих параметров, при которых $R' = \infty \ (\Omega = 0)$, т.е. судно будет переведено на прямой курс.

За время $\tau = \tau_1 + \tau_2$ диаметральная плоскость судна повернется на некоторый угол $\psi_{од}$, а курс судна в момент начала маневрирования $\psi_н$ определится по выражению

$$\psi_н = \Delta\psi - \psi_{од}, \tag{4}$$

где $\Delta\psi$ – угол поворота судового хода;

$\psi_{од}$ – угол упреждения начала маневрирования при переводе судна с поворота радиуса $R$ на прямой курс.

Таким образом, задаваясь величиной радиуса поворота $R$ и рассчитывая время $\tau_1$ и $\tau_2$ при известных начальных условиях $\theta = \theta_R$, $\beta = \beta_R$, $\Omega = \Omega_R$, $\delta_р = \delta_R$ и $\psi = 0$, получаем строго соответствующие значениям радиусов поворотов параметры управления судном: угол упреждения $\psi_{од}$, угол перекладки рулевого органа в противоположную повороту сторону $\delta_{од}$ и угол перекладки в сторону поворота $\delta'_{од}$

$$\left.\begin{aligned} \delta_{од} &= \delta_R - \Omega_р \tau_1 ; \\ \delta'_{од} &= \delta_{од} + \Omega_р \tau_2 . \end{aligned}\right| \tag{5}$$

Если $\tau_1$ окажется больше $\tau_R + \tau_р$ ($\tau_R$ – время перекладки на угол $\delta_R$), то

$$\left.\begin{aligned} \delta_{од} &= -\delta_{max} ; \\ t_з^{од} &= L(\tau_1 - \tau_R - \tau_р) / v_0 , \end{aligned}\right| \tag{6}$$

где $t_з^{зд}$ – время задержки органа управления в положении $-\delta_{max}$.

В дальнейшем рулевой орган перекладывается с таким расчетом, чтобы постоянно выполнялось равенство

$$\Omega = (1/\theta)(d\beta/d\tau). \qquad (7)$$

Тогда $d\varphi_c/d\tau = (d\psi/d\tau) - (d\beta/d\tau) = 0$,

т.е. движение судна будет прямолинейным.

Подставляя выражение (7) в уравнения (I), получаем [2]

$$\begin{aligned} & d^2\theta/d\tau^2 = (\bar{m}k_{11}/m_1)\theta\beta(d^2\beta/d\tau^2) + (\bar{m}k_{11}/m_1)\times \\ & \times[\beta(d\theta/d\tau) + \theta(d\beta/d\tau)](d\beta/d\tau) - (1/m_1)(2a_x\theta - \\ & - a_x)(d\theta/d\tau); \\ & d^2\beta/d\tau^2 = (\chi/m_3')(c_{yk} + c_{mk}/\chi)\theta^2 + (\chi m_2/m_3')\beta\times \\ & \times(d\theta/d\tau) + [(\chi\bar{m}k_{22})/m_3']\theta(d\beta/d\tau); \\ & \delta_r = (c_{yk}/E) + æ_r\beta + (m_2/E\theta^2)(d\theta/d\tau) + [(\bar{m}\times \\ & \times k_{22})/(E\theta) + (æ_r\chi)/\theta](d\beta/d\tau). \end{aligned} \qquad (8)$$

Решая уравнения (8) с учетом равенства (7), определяем характер перекладки органа управления в течение некоторого времени после вывода судна с поворота на прямой курс.

На основании анализа результатов расчетов и натурных испытаний судоводителям можно рекомендовать сразу же переводить рулевой орган из положения $\delta_{од}'$ в положение $\delta_r = 0$ и в дальнейшем корректировать, если потребуется, курс судна в соответствии с окружающей обстановкой.

По изложенной в данной статье методике для теплохода

пр.1565 выполнен предварительный расчет характера перекладки органа управления $\delta_R, \delta_{од}, t_j^{од}, \delta_{од}'$ и угла упреждения $\psi_{од}$ для скорости полного хода и условий плавания на глубокой спокойной воде (табл.I), а затем проведены натурные испытания судов данного типа в озерной части Горьковского водохранилища.

Таблица I

Зависимость параметров управления теплоходом пр.1565 от величины радиуса поворота

| $R$, м | $\delta_R$, град | $\psi_{од}$, град | $\delta_{од}$, град | $t_j^{од}$, с | $\delta_{од}'$, град |
|---|---|---|---|---|---|
| 300 | 6,5 | 8,0 | -35,0 | 0,0 | I0,0 |
| 400 | 3,4 | 5,0 | -3I,5 | 0,0 | 9,5 |
| 500 | I,8 | 3,0 | -28,5 | 0,0 | 8,5 |
| 600 | 0,9 | 2,0 | -26,5 | 0,0 | 8,0 |
| 700 | 0,3 | I,5 | -24,5 | 0,0 | 7,5 |
| 800 | -0,I | I,5 | -23,0 | 0,0 | 7,5 |
| 900 | -0,3 | I,0 | -2I,5 | 0,0 | 7,5 |
| I000 | -0,5 | I,0 | -20,5 | 0,0 | 7,0 |
| II00 | -0,6 | I,0 | -I9,5 | 0,0 | 6,5 |
| I200 | -0,7 | 0,5 | -I8,5 | 0,0 | 6,5 |
| I300 | -0,8 | 0,5 | -I7,5 | 0,0 | 6,0 |
| I400 | -0,8 | 0,5 | -I7,0 | 0,0 | 6,0 |
| I500 | -0,8 | 0,5 | -I6,0 | 0,0 | 5,5 |

Целью экспериментов была проверка соответствия расчетных и действительных углов, на которые поворачивалось судно за время выхода с поворота на прямой курс.

В процессе испытаний суда выводились с установивших-

ся циркуляций различных радиусов (от 300 до 700 м) на прямой курс путем перекладки рулевого органа из положения $\delta_R$ на расчетные углы $\delta_{од}$, $\delta'_{од}$ и $\delta_r = 0$, как показано на рис.I, а изменение курса за время одерживания определялось по судовому магнитному компасу.

Натурные наблюдения показали, что разница между расчетными и действительными значениями углов упреждения лежит в пределах точности постановки эксперимента, так как максимальное расхождение составило $\pm 2^\circ$.

Кроме того, в навигацию 1986 г. на участке р.Волги Н.Ржавский перекат (927 км) - перекат Устье Телячьей воложки (93I км) "расчетным" методом (т.е. используя результаты предварительного расчета параметров управления по методике, изложенной в работе [2] и в настоящей статье) выполнено II радиолокационных проводок судов типа "Волго-Дон" в груженом и порожнем состоянии по криволинейному участку с шириной судового хода $B_{с.х} = 200$ м, радиусом поворота $R = 700$ м, углом поворота судового хода $\Delta\psi = 50^\circ$ при скорости течения $C = \pm$ I м/с. Для сравнения выполнено 5 радиолокационных проводок теплоходов того же типа в груженом состоянии глазомерным методом. Траектории движения судов определялись с помощью теодолитов методом неподвижного базиса.

По результатам обработки наблюдений установлено, что максимальное поперечное смещение ц.т. судна относительно оси судового хода при проводке расчетным методом составило 27 м, а при проводке глазомерным методом - 95 м.

Таким образом, расчетный метод по сравнению с глазо-

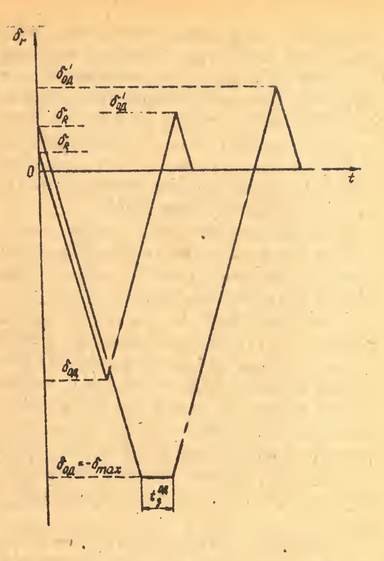



Рис.I. Характер перекладки рулевого органа при переводе судна с поворота заданного радиуса на прямой курс

мерным дает возможность в 3,5 раза точнее осуществлять радиолокационную проводку судов на поворотах реки.

Результаты поставленных экспериментов позволяют рекомендовать предложенную в данной статье методику расчета параметров управления судном при разработке справочных пособий, которые могут оказать помощь судоводителям в повышении безопасности плавания на криволинейных участках внутренних водных путей.

## Литература


I. Павленко В.Г., Витавер Л.М. Приближенная теория движения твердого тела в установившемся потоке однородной несжимаемой жидкости.- В сб.: Совершенствование ходовых и маневренных качеств судов. - Тр./НИИВ., 1984, с.8-25.

2. Тихонов В.И. Исследование управления судном при переходе с прямого курса на поворот заданного радиуса.- Тр./ГИИВТ,1937, вып.223, с.27-47.

УДК 621.396.967.656.62.053

А.И.Голубев

# РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ПРОВОДКА СУДНА НА ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ С ЛАТЕРАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время на внутренних водных путях плавучие знаки навигационного ограждения (буи, бакены, вехи) являются основными ориентирами при радиолокационной проводке судна, так как створные знаки, как правило, не просматриваются на экране радиолокационной станции (РЛС) на фоне изображения берега.

Если принять во внимание, что протяженность прямолинейных участков пути Единой глубоководной системы Европейской части РСФСР [I] с латеральной системой ограждения составляет 37% от общей протяженности пути, то актуальность данной статьи вполне очевидна.

Типичным способом оборудования судового хода на прямолинейных участках пути с латеральной системой является ограждение с помощью трех плавучих навигационных знаков, в дальнейшем именуемых буями.

В статье дается обоснование чувствительности и габаритной ширины полосы радиолокационной проводки судна при латеральной системе навигационного оборудования на прямолинейных участках пути.

Под чувствительностью радиолокационной системы латерального типа следует понимать то наименьшее боковое смещение судна относительно оси судового хода, которое замечает судоводитель на экране РЛС. Для определения чувствительно-

сти системы латерального типа рассмотрим рис.I. Оператор при движении судна по участку пути с латеральной системой расстановки буев стремится удержать центральное пятно экрана РЛС 4 на линии $a-a$, проходящей через середину ширины судового хода $B_{c.x}/2$. Середина судового хода на экране РЛС определяется судоводителем с помощью визирной нити 5, которую надо установить так, чтобы она делила пополам отрезок между "размытыми" отметками буев I и 3 и была бы параллельной "размытым" отметкам I и 2.

Чувствительность данной системы зависит от величины "размытости" отметок буев и флюктуации их размеров, точности установки визирной линии относительно трех буев, протяженности участка и ширины судового хода, а также периодичности радиолокационной информации.

Боковое смещение судна относительно линии, проходящей через геометрические центры отметок буев I и 2 (см.рис.I), определяется выражением

$$y = [r_1 r_2 (\lambda + \eta)] / (ML_\delta), \qquad (1)$$

где $r_1, r_2$ – расстояние до носовых буев I, 3 и кормового буя 2, мм;

$\lambda, \eta$ – угол между визирной нитью 5 и направлением с судна на носовой I и кормовой буй 2, рад;

$M$ – масштаб радиолокационного изображения;

$L_\delta$ – расстояние между носовыми буями I, 3 и кормовым буем 2, мм.

Углы $\lambda$ и $\eta$ находятся по формулам

$$\lambda = 3m_1 / \sqrt{n} r_1 + b_\eta / 2r_1 + \Delta b_1 / r_1 + b_{H_1}^{max} / 2r_1 ; \qquad (2)$$

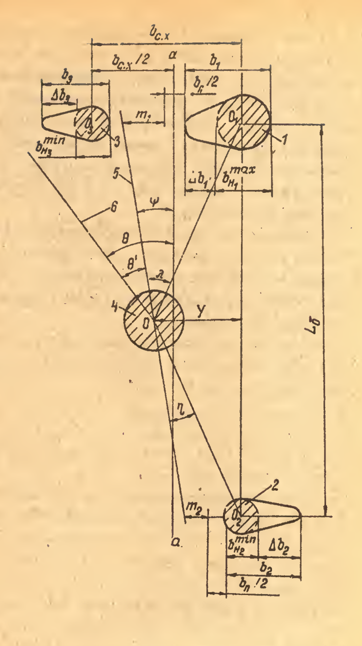



Рис.I. Радиолокационная система латерального типа

$$\eta = 3m_2 / \sqrt{n} r_2 + b_n / 2r_2 + b_{H_2}^{min} / 2r_2 .\qquad (3)$$

Здесь $3_{m_1}, 3_{m_2}$ – предельное значение ошибки деления пополам отрезка между буями I и 3, 2 и 3;

$n$ – число определений положения центрального пятна на экрана РЛС относительно носовых и кормовых буев;

$\Delta b_1$ – величина "размытости" отметки носового ориентира I, мм;

$b_{H_1}^{max}$ – максимальный поперечный размер отметки носового ориентира I, мм;

$b_{H_2}^{min}$ – минимальный поперечный размер отметки кормового ориентира 2, мм;

$b_n$ – расстояние между носовыми буями I и 3 с учетом размеров "размытых" отметок, мм:

$$b_n = b_{C.X} - b_{H_1}^{max}/2 - b_{H_3}^{min}/2 - \Delta b_1 ,\qquad (4)$$

где $b_{C.X}$ – ширина судового хода, мм;

$b_{H_3}^{min}$ – минимальный поперечный размер отметки подвижного носового ориентира 3, мм.

Экспериментальные исследования [2] показывают, что $b_{H_1}^{max} - b_{H_3}^{min} \cong b_{H_1}$, т.е.

$$b_n = b_{C.X} - b_{H_1} - \Delta b_1 .\qquad (5)$$

Подставив выражения (2), (3) и (5) в формулу (I), после алгебраических преобразований получим

$$y = (b_{H_1}^{max} r_2 + b_{H_2}^{min} r_1)/(2ML_\delta) - (b_{H_1}/4M) +$$
$$+ [\Delta b_1 (r_2 - r_1)]/(2ML_\delta) + (3m_1 r_2 + 3m_2 r_1)/(ML_\delta \sqrt{n}) +$$
$$+ (b_{c.x}/2M). \qquad (6)$$

Значения поперечных размеров точечных радиолокационных ориентиров (буев) $b_{H_{1(2)}}$ на экране РЛС "Донец-2" определяются по эмпирическим формулам [2]

$$b_{H_{1(2)}} = k r_{1(2)} + N. \qquad (7)$$

Величина "размытости" отметок буев равна

$$\Delta b_1 = M\left[\omega (r_1/M + v_0 t_э \pm c_T t_э/2) + v_0 tg\theta'\right] t_э - (b_{H_1}/4). \qquad (8)$$

Здесь $\omega$ – угловая скорость рыскания судна на курсе, рад/с;

$t_э$ – длительность послесвечения экрана, с;

$v_0$ – скорость судна, м/с;

$c_T$ – скорость течения, м/с;

$\theta'$ – угол между диаметральной плоскостью судна 6 и направлением его движения 5, рад:

$$\theta' = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \varphi^2}, \qquad (9)$$

где $\alpha$ – угол ветрового дрейфа, рад;

$\beta$ – угол сноса судна течением, рад;

$\gamma$ – угол инструментальной ошибки РЛС, рад;

$\varphi$ – угол рыскания судна на курсе, рад.

Предельное значение ошибки деления пополам расстояния между "размытыми" отметками носовых ориентиров I и 3 рассчитывается по формуле

$$3m_{1(2)} = 0{,}028 - (l - \rho) + 0{,}36, \qquad (10)$$

где $l$ – поперечный размер отметки буя или расстояние между буями, мм;

$\rho$ – ширина нити механического визира, мм.

Чувствительность радиолокационной системы латерального типа определяется не только величиной бокового смещения $Y_{max}$, но и значением постоянного бокового смещения судна $З_{m_ц}$ с оси судового хода, которое вызывается неточностью установки центрального пятна экрана РЛС. Предельное значение ошибки в установке центрального пятна экрана РЛС определяется по формуле (10), где $l$ принимается равным диаметру центрального пятна.

Кроме того, из-за периодичности поступления информации на экран радиолокатора судно дополнительно смещается с оси судового хода на величину $\Delta Y$:

$$\Delta Y = (v_0 T_a / 2) tg\theta + (v_0 \omega' T_a^2 / 8) . \quad (11)$$

Здесь $T_a$ – период вращения антенны РЛС, о;

$\theta$ – угол между осью судового хода $a-a$ и диаметральной плоскостью судна 6, рад:

$$\theta = \theta' + \varphi , \quad (12)$$

где $\varphi$ – угол между осью судового хода $a-a$ и визиром 5, рад.

Предельное значение угла $\varphi_{max}$, возникающего при радиолокационном методе судовождения, определяется выражением

$$\varphi_{max} = 3(m_1 - m_2) / (\sqrt{n} L_б) + (\Delta b_1 / L_б) + + (b_{н_1}^{max} - b_{н_2}^{min}) / (2L_б) . \quad (13)$$

Таким образом, чувствительность системы латерального типа равна

$$E_{пр}^{л}=(1/M)\big[(b_{H_1}^{max}r_2+b_{H_2}^{min}r_1)/(2ML_б)-(b_{H_1}/4M)+$$
$$+(\Delta b_1/2ML_б)(r_2-r_1)+(3m_1 r_2+3m_2 r_2)/(ML_б\sqrt{r_1})+$$
$$+3m_ц\big]+\Delta Y. \qquad (14)$$

По формуле (I4) произведен расчет чувствительной радиолокационной системы латерального типа. При расчете приняты условия:

ветер отсутствует;

течение постоянно по величине, а направление его струй совпадает с направлением оси судового хода;

судно типа "Родина" удерживается на курсе при помощи магнитного компаса.

В качестве исходных данных приняты:

ширина судового хода $b_{C.X}$ = I00 + I50 м;

расстояние между буями $L_б$ = I200÷3300 м;

ширина нити механического визира РЛС "Донец-2" $\rho$ = 0,3 мм;

скорость судна $v_0$ = 2÷7 м/с;

скорость течения $C_T$ = I,04 м/с;

угловая скорость рыскания судна на курсе $\omega$ = 0,0035 рад/с;

угол рыскания судна на курсе $\varphi$ = 0,035 рад;

угол инструментальной ошибки РЛС "Донец-2" $\gamma$ = 0,022 рад;

время послесвечения экрана РЛС $t_э$ = I2 с;

период вращения антенны РЛС $T_a$ = 4 с;

поперечный размер центрального пятна на экране РЛС на шкале 0,75 мили $d$ = 4 мм, а на шкале I,5 мили $d$ = 3 мм;

число определений $n$ = 2.

Результаты теоретических расчетов $E^{л}_{пр}$ произведены применительно к речным участкам пути и представлены в табл.I.

Таблица I

Теоретические расчеты $E^{л}_{пр}$

| Шкала РЛС "Донец-2" | Ширина судового хода, м | Расстояние между буями, м | Чувствительность радиолокационной системы латерального типа, м | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $v_0$ = 7 м/с | | $v_0$ = 2 м/с | |
| | | | вниз | вверх | вниз | вверх |
| 0,75 | I00 | I200 | 20,2I | 20,22 | I9,92 | I9,94 |
| 0,75 | I00 | I350 | 20,70 | 20,7I | 20,4I | 20,43 |
| 0,75 | I00 | I500 | 2I,I9 | 2I,20 | 20,90 | 20,92 |
| 0,75 | I00 | I650 | 2I,66 | 2I,70 | 2I,39 | 2I,4I |
| I,5 | I50 | I800 | 43,54 | 43,56 | 43,26 | 43,28 |
| I,5 | I50 | 2I00 | 44,53 | 44,55 | 44,25 | 44,27 |
| I,5 | I50 | 2400 | 45,53 | 45,55 | 45,25 | 45,27 |
| I,5 | I50 | 2700 | 46,52 | 46,54 | 46,24 | 46,26 |
| I,5 | I50 | 3000 | 47,52 | 47,54 | 47,23 | 47,25 |
| I,5 | I50 | 3300 | 48,5I | 48,53 | 48,23 | 48,25 |

Анализ табл.I показывает, что чувствительность радиолокационной системы латерального типа $E^{л}_{пр}$ на прямолинейных участках пути существенным образом зависит от масштаба $M$ шкалы РЛС, расстояния между буями $L_б$, ширины судового хода $b_{с.х}$, незначительно от скорости судна $v_0$ и практи-

чески не зависит от направления движения (вверх, вниз).

Чувствительность радиолокационной системы латерального типа больше (хуже) чувствительности радиолокационной системы маячного типа на 50 – 70% из-за флюктуации отметок и двустороннего характера радиолокационных ориентиров.

Точность глазомерной проводки судна с помощью РЛС оценивается шириной ходовой полосы, занимаемой судном при прохождении того или иного участка. С учетом того факта, что движение по криволинейной траектории обычно устойчиво, значение ширины полосы проводки судна по радиолокационной системе латерального типа может быть [2] определено выражением

$$B_{пр}^{л} = 2\left[E_{пр}^{л} + v_0 \theta (2t_p + t_к) + l_п \theta + R_0 (1 - \cos\theta) + (L/2) \times \right.$$
$$\left. \times \sin\beta_ц \right] + 1{,}5B\,, \qquad (15)$$

где $L, B$ – длина и ширина судна, м;

$t_p$ – время реакции рулевого и судоводителя, с;

$t_к$ – время, потраченное на подачу команды, с;

$l_п$ – прямолинейное смещение судна, м.

Ширину полосы проводки судна в конкретных условиях плавания (при постоянных значениях угла $\theta$ и скорости $v_0$) можно снизить лишь в результате уменьшения радиуса циркуляции $R_0$. Однако с уменьшением радиуса растут прямолинейное смещение $l_п$ и угол дрейфа $\beta_ц$. Следовательно, необходимо найти такие значения радиуса $R_0$ (при заданных величинах угла $\theta$ и скорости $v_0$), при которых дополнительные боковые смещения $\Delta b$ будут минимальными.

$$\Delta b = v_0 \theta (2t_p + t_к) + l_п \theta + R_0 (1 + \cos\theta) + (L/2) \sin\beta_ц\,. \qquad (16)$$

Угол дрейфа судна на циркуляции $\beta_ц$ может быть найден для любого судна по эмпирической формуле [4]

$$\beta_ц = (1-0,879\bar{l}_к)[(\bar{R}_0+2,2)/(0,9\bar{R}_0^2+ +1,6\bar{R}_0+1,4)], \qquad (17)$$

где $\bar{l}_к$ – относительное расстояние от центра тяжести судна до рулевого органа;

$\bar{R}_0$ – относительный радиус циркуляции.

Результаты расчетов дополнительных боковых смещений судна типа "Родина" для скорости хода $v_0$ = 2÷7 м/с представлены в табл.2.

Таблица 2

Теоретические расчеты $\Delta b$, м

| Угол пути $\theta$, град | Оптимальное значение радиуса $R_0$, м | Дополнительное боковое смещение судна, м | |
|---|---|---|---|
| | | $v_0$ = 2 м/с | $v_0$ = 7 м/с |
| I,0 | 3500 | 2,5I | 2,78 |
| 2,0 | 3000 | 4,57 | 5,II |
| 3,0 | 2500 | 7,34 | 8,26 |
| 4,0 | I800 | I0,28 | II,66 |
| 5,0 | I500 | I3,3 | I5,I8 |
| 6,0 | I300 | I7,28 | I8,8 |

Результаты расчетов габаритной ширины ходовой полосы проводки теплохода "Родина" $B_{пр}^{л}$ на прямолинейных участках реки с латеральной системой навигационного ограждения представлены на рис.2.

Анализ рис.2 показывает, что габаритная ширина ходовой полосы $B_{пр}^{л}$ на прямолинейных участках реки с лате-

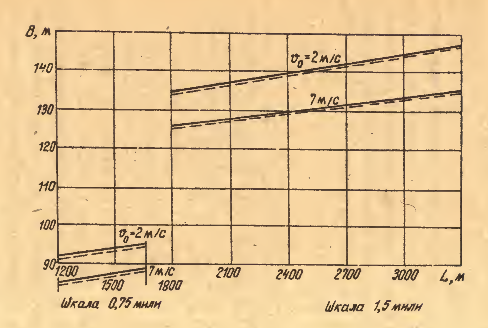



Рис.2. Габаритная ширина ходовой полосы проводки теплохода "Родина" по радиолокационной системе латерального типа: —— - движение вниз; – – – - движение вверх

ральной системой навигационного оборудования существенным образом зависит от масштаба шкалы $M$, скорости судна $v_0$ и практически не зависит от направления движения (вверх, вниз). По сравнению с маячной системой ориентировки точность радиолокационной проводки водоизмещающего судна на участках, оборудованных латеральной системой ограждения, больше (хуже) в I,4-I,5 раза.

Итак, теоретические исследования точности радиолокационных проводок водоизмещающих судов на прямолинейных участках реки с латеральной системой навигационного оборудования позволяют сделать заключение о том, что безопасность плавания судов в оба направления обеспечивается в том случае, если при ширине судового хода $b_{c.x}$ = 100 м используется шкала 0,75 мили РЛС "Донец-2", а при $b_{c.x}$ = 150 м - шкала I,5 мили.

## Литература.

I. Голубев А.И., Глазова Н.В., Майлисов Е.М. Исследование путевых условий плавания судов по Единой глубоководной системе Европейской части РСФСР.- Тр./ГИИВТ, 1982, вып.191, с.99-108.

2. Голубев А.И., Тихонов В.И. Теория радиолокационных створов маячного типа.- Тр/ГИИВТ, 1982, вып.191, с.41-60.

3. Бухановский И.Л. Радиолокационные методы судовождения.- М.: Транспорт, 1964.- 86 с.

4. Шанчуров П.А., Соларев Н.Ф., Щепетов И.А. Управление судами и составами.- М.: Транспорт, 1971.- 352 с.

УДК 627.913

Б.А.Самогин,
В.А.Хохлов

# МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ РАССТАНОВКИ ЗНАКОВ ПРИ ОСЕВОЙ СИСТЕМЕ

Рост интенсивности судоходства, скоростей движения судов и увеличение габаритов составов выдвигают повышенные требования к навигационному ограждению судового хода. Система ограждения и частота расстановки различных знаков должны исключать возможность возникновения аварийных ситуаций.

С момента внедрения осевой системы прошло более 20 лет, но до сих пор нет четких рекомендаций по частоте расстановки знаков. Данная работа восполняет этот пробел.

Для надежной ориентировки судоводителя необходимо, чтобы, следуя от одного знака, он мог видеть очередной, т.е. расстояние между знаками должно определяться дальностью видимости силуэта знака днем и сигнального огня в темное время суток.

Реальная дальность видимости знака, а также огня с определенной силой света на данном фоне зависит от яркости фона и прозрачности атмосферы или метеорологической дальности видимости. Для выявления этой зависимости были проведены натурные исследования по установлению степени видимости буев различной окраски при различных атмосферных условиях. Наблюдения проводились с помощью измерителя дальности видимости ИДВ, разработанного в геофизической обсерватории. Результаты исследований показали, что степень видимости черных буев выше, чем белых.

При изменении метеорологических условий и при различных яркостях воды практически стабильна степень видимости черно-белых буев, что объясняется постоянным значением контраста между черной и белой частями буя. Это говорит о том, что применяемая в настоящее время окраска осевых буев является наиболее пригодной для обеспечения дальности видимости, которая зависит только от прозрачности атмосферы.

На основании выполненных исследований рекомендуется следующее соотношение для расчета дальности видимости буя ОБ-3,26 в светлое время суток:

$$S = 11,5(1 - e^{-0,075_M}), \quad (1)$$

где $S_M$ – метеорологическая дальность видимости, км.

Аналогичные наблюдения производились в темное время суток по определению дальности видимости белого огня, установленного на буе ОБ-3,26 с фонарем кругового действия ЭСП-90 и источником света мощностью 6 Вт. Получена следующая зависимость дальности видимости белых проблесковых огней от метеорологической дальности видимости:

$$S = 5,53(1 - e^{-0,31S_M}). \quad (2)$$

Таким образом, решение задачи нахождения оптимального расстояния между знаками сводится к выбору расчетного значения метеорологической дальности видимости определенной обеспеченности $P$. Ниже приводится расчет, выполненный применительно к Куйбышевскому водохранилищу.

Для обоснования расчетного значения были обработаны данные фактических наблюдений за метеорологической дально-

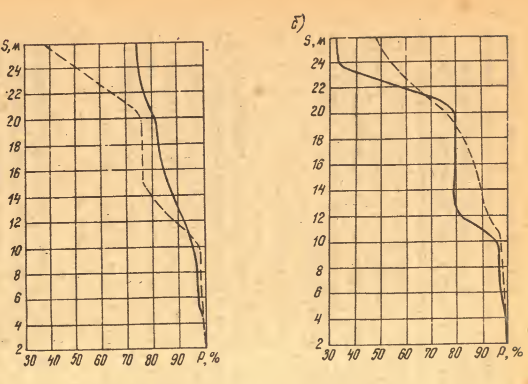



Рис.I. Обеспеченность метеорологической дальности видимости по метеостанциям Тольятти (а) и Лайшево (б)

——— - светлое время суток; – – – - темное время суток

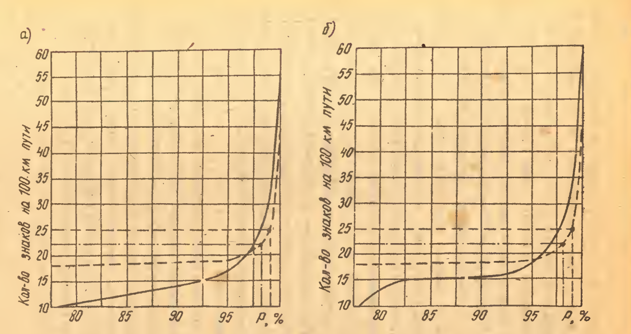



Рис.2. Обеспеченность реальной видимости знаков в зависимости от частоты их расстановки:

а – на нижнем участке Куйбышевского водохранилища (метеостанция Тольятти);
б – на верхнем (метеостанция Лайшево)

—— – светлое время суток; – – – – темное время суток

стью видимости по метеостанциям Лайшево и Тольятти. По этим данным построены графики обеспеченности метеорологической дальности видимости для светлого и темного времени суток (рис.I). Оптимальное расстояние между знаками определяется по графикам обеспеченности реальной видимости знаков в зависимости от частоты их расстановки (рис.2). Для большей наглядности на этих графиках по оси ординат обозначено не расстояние между знаками, а количество знаков, приходящихся на 100 км пути в зависимости от расстояния между знаками.

Если принять, что затраты на содержание судоходной обстановки пропорциональны количеству знаков, то эти графики дают представление о соотношении затрат на содержание обстановки и обеспеченности реальной видимости знаков. Нижняя часть кривой свидетельствует о значительном росте обеспеченности видимости при небольшом увеличении количества знаков. Верхняя часть кривой дает представление о значительном увеличении количества знаков при минимальном росте обеспеченности видимости.

Точка перегиба кривой определяет оптимальное соотношение между количеством знаков и обеспеченностью видимости. Эта точка соответствует расстоянию между буями 4,5 км.

Учитывая необходимость заблаговременного обнаружения знака, за расчетное значение следует принять верхнюю точку перегиба кривой. Эта точка соответствует расстоянию между буями 4,0 км с обеспеченностью видимости 98%.

УДК 658.012.011.56

Н.Л.Куликова,
В.Д.Лоскутов,
Ю.Б.Купцов

# ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ АСУ ТП "КАНАЛ"

Рост интенсивности судопропуска по Волго-Донскому судоходному каналу имени В.И.Ленина привел к появлению проблемы надежного, безопасного и эффективного управления движением флота и работой гидросооружений. Для решения этой проблемы в настоящее время на ВДСК имени В.И.Ленина создается автоматизированная система управления технологическим процессом судопропуска - АСУ ТП "Канал", представляющая собой комплекс организационных, технологических и технических элементов, функционирующих как единое целое.

При выборе комплекса технических средств создаваемой системы учитывались следующие особенности:

высокие требования по надежности работы оборудования;

существующий уровень автоматизации объекта;

непрерывность хода технологического процесса судопропуска во времени;

значительная протяженность канала (101 км) и расположение объектов управления вдоль линии канала;

однотипность одной из составляющей объекта управления - шлюзов;

требования к унификации технических средств с целью упрощения обслуживания и программирования;

наличие единого изготовителя средств - Минприбор.

Укрупненно в общем виде технические средства системы представлены структурой, приведенной на рис.I. Комплекс технических средств (КТС), реализующий сбор и обработку информации об объекте, формирование и выдачу управляющих воздействий на объект управления, можно разбить на четыре основные части:

технические средства управления процессом шлюзования;

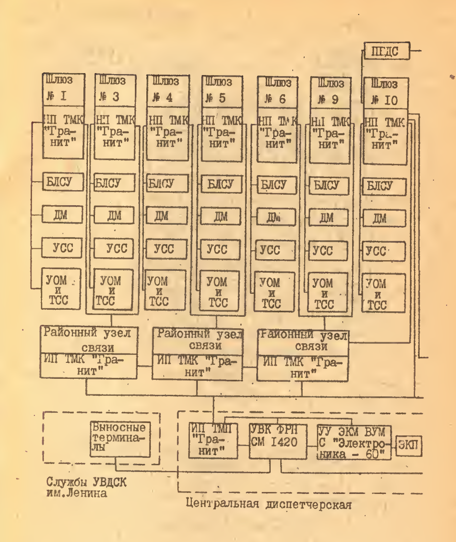
технические средства определения местонахождения и технологического состояния судов;

средства сбора, обработки и передачи данных в центральную диспетчерскую (ЦДП);

технические средства ЦДП.

Технические средства управления процессом шлюзования и средства определения местонахождения и технологического состояния судов, расположенные на шлюзах канала, представляют собой нижний уровень иерархии создаваемой системы и включают в свой состав следующие компоненты: бесконтактную логическую систему управления судопропуском (БЛСУ ); устройство связи с судами (УСС) и устройство определения местоположения и технического состояния судна (УОМ и ТСС); устройство отображения технологической информации диспетчерскому персоналу шлюза - дисплейный модуль (ДМ).

Отличительной особенностью технических средств, устанавливаемых на IO и I3 шлюзах, является наличие пунктов безопасности движения судов (ПБДС), что обусловлено географическими особенностями расположения этих шлюзов (во-


ПГДС
Шлюз № I
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Шлюз № 3
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Шлюз № 4
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Шлюз № 5
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Шлюз № 6
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Шлюз № 9
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Шлюз № 10
НП ТМК "Гранит"
БЛСУ
ДМ
УСС
УОМ и ТСС
Районный узел связи
ИП ТМК "Гранит"
Районный узел связи
ИП ТМК "Гранит"
Районный узел связи
ИП ТМК "Гранит"
Выносные терминалы
ИП ТМП "Гранит"
УВК ФРП СМ 1420
УУ ЭКМ ВУМ С "Электроника - 60"
ЭКП
Службы УВДСК им.Ленина
Центральная диспетчерская

Продолжение рис.I

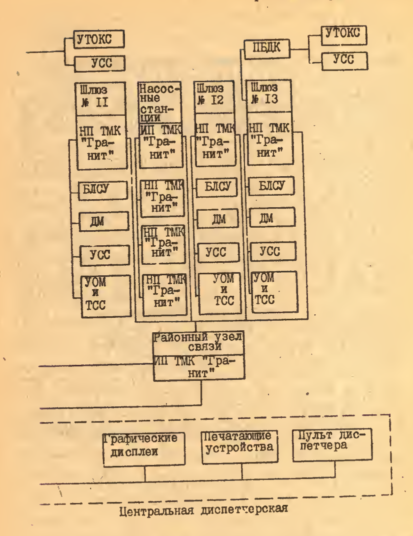



Рис.I.Структурная схема технических средств АСУ ТП "Канал": УТОКС – устройство точного определения координат судов

дохранилища и зона подхода к каналу со стороны Цимлянского моря).

Сбор, первичная обработка информации со шлюза и ретрансляция ее в центральную диспетчерскую осуществляются телекомплексом "Гранит". Телекомплекс имеет агрегатное построение и компонуется из программируемых и аппаратных устройств, представленных интеллектуальными (ИП) и неинтеллектуальными (НП) пунктами.

Исходя из того, что НП телемеханики работает по жесткой программе и рассчитан для функционирования на необслуживаемых объектах, предполагается на каждом из шлюзов разместить неинтеллектуальный пункт комплекса.

Поскольку ТМК "Гранит" обеспечивает работу по стандартным каналам связи и организация линий связи может быть как магистральной, так и древовидной, на первом этапе создания АСУ ТП "Канал" предполагается использовать существующие линии связи.

В результате анализа возможных структур организации технических средств создаваемой АСУ одним из наиболее приемлемых вариантов с точки зрения повышения живучести системы принят вариант с децентрализацией вычислительного процесса. Роль узла по промежуточной обработке и хранению данных выполняет ИП ТМК "Гранит", расположенный в существующих районных узлах связи.

Две микро-ЭВМ "Электроника-60", входящие в состав ИП, работают независимо друг от друга, корректируя по межмашинному каналу базу данных друг друга. Предусмотрен обмен информацией между ИП районных узлов связи и ИП, входящим

в состав технического обеспечения центральной диспетчерской канала.

Крупными техническими объектами канала, определяющими его работу, являются насосные станции. К настоящему времени аппаратура управления и контроля работы насосными станциями устарела и нуждается в модернизации. Учитывая специфику технологии работы насосных станций и их территориальное расположение, на каждой из них предполагается разместить по одному НП ТМК "Гранит", в качестве координирующего устройства для обработки и отображения информации энергодиспетчеру целесообразно использовать ИП ТМК "Гранит".

Набор технических средств верхнего уровня иерархии - центрального диспетчерского пункта - определяется перечнем функций АСУ ТП "Канал". Учитывая высокий коэффициент готовности, предъявляемый к КТС, а также необходимость обеспечения развития создаваемого банка данных, целесообразно в качестве центральной машины выбрать управляющий вычислительный комплекс функционально резервируемый повышенной надежности (УВК ФРН). Он выполнен на двух ЭВМ типа СМ 1420, соединенных посредством дуплексных регистров и имеющих единую операционную систему. УВК ФРН располагает устройствами внешней памяти, доступными для каждой из машин.

Дисководы СМ 5408, входящие в состав УВК ФРН, позволяют создавать банки данных, обладающие большой мощностью.

Используя стандартный конвертор связи ЭВМ типа

СМ I420 и "Электроника-60", можно обеспечить выход УВК ФРН на ИП ТМК "Гранит" и устройство управления к экрану коллективного пользования. Набор периферийных устройств, входящих в состав УВК ФРН, и поставляемое с комплексом программное обеспечение позволяют организовать доступ к банку данных различным пользователям (службы канала, смежные диспетчерские пункты, АСУ "Речфлот").

Разрабатываемая система отображения технологической информации ЦДП комплектуется серийно изготовляемой индикаторной аппаратурой, имеющей выход на интерфейс "Общая шина", и включает в себя следующие устройства: экран коллективного пользования (ЭКП), устройство управления к экрану коллективного пользования (УУ ЭКП), индивидуальный диспетчерский пульт, печатающие устройства, графические дисплеи.

ЭКП в отличие от применения стандартных мнемосхем, используемых в составе диспетчерского оборудования, дает диспетчерскому персоналу канала возможность получать информацию о ходе технологического процесса судопропуска в виде световых букв и графических изображений.

Конструктивно индикаторное поле ЭКП представляет собой наборную конструкцию из индикаторных газоразрядных блоков ИМГ-3-0I и образовано объединением восьми секций по I2 блоков ИМГ в каждой. Индикаторное поле имеет размеры I280xI20 см.

Устройство управления ЭКП представляет собой самостоятельное универсальное функционально законченное устройство, выполненное на базе микро-ЭВМ "Электроника-60",

и автономно выполняет необходимые функции по обработке и хранению поступающих из телесистемы данных и выводу информации на ЭКП. Важной особенностью УУ ЭКП является возможность долговременного хранения информации.

Разработанное в настоящее время программное обеспечение к ЭКП позволяет выводить и редактировать алфавитно-цифровую и графическую информацию в любую точку экрана, представлять информацию как в позитивном, так и в негативном изображении, работать в режиме "маркера", производить масштабирование представленных на ЭКП символов.

УДК 658.012.011.56:656.62

С.Д.Щуко,
С.М.Эхова

# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ УЧАСТКА КАНАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТРИ ШЛЮЗА

В связи с планируемым увеличением объема перевозок через Волго-Донской судоходный канал (ВДСК) большую актуальность приобретает задача повышения пропускной способности шлюзованных систем и обеспечения безопасности движения по ним [I].

Вопросам совершенствования судопропуска на одиночных шлюзах были посвящены работы д.т.н. С.М.Пьяных [2-4]. В работах к.т.н. Ю.Н.Ковалева проводилась оценка пропускных способностей ВДСК с применением методов статистического моделирования [5]. Однако вопросы выбора оптимального режима работы ВДСК с учетом требований безопасности судопропуска комбинаторным перебором всех возможных вариантов не нашли отражения в литературе.

Реализация математической модели комбинаторного перебора вариантов судопропуска для всего канала слишком объемна. Поэтому канал разбивается на части, для которых задача оптимизации решается последовательно, со стыковкой в точках деления канала.

Автоматическая выработка оптимального плана судопропуска является одной из подсистем проектируемой системы АСУ ТП "Канал".

В данной работе рассматривается задача отыскания оптимального судопропуска через три шлюза Волжского склона.

I. Постановка задачи.

Рассматривается участок ВДСК, содержащий любые три последовательные шлюза "Волжской лестницы" из девяти и четыре бьефа, примыкающие к ним. Подходы к первому и девятому шлюзам моделируются бьефами.

Требуется найти оптимальный вариант плана пропуска судов через рассматриваемый участок за данное время.

Время перемещения судна по рассматриваемому участку канала определяется не только скоростью движения судна по бьефам, но и временем занятости шлюзовых камер.

Время занятости шлюзовой камеры определяется одним из режимов ее работы:

I) ожидание судна, подходящего к воротам шлюза по бьефу, и шлюзование этого судна;

2) наполнение (сброс) призмы;

3) аварийная остановка шлюза.

За время занятости шлюзовой камеры суда перемещаются по бьефам к воротам шлюза.

Бьефы между рассматриваемыми шлюзами настолько малы (I,5-2 км), что движение по ним судов с максимальной скоростью существенно меньше времени шлюзования судов или времени наполнения (сброса) призмы.

Размеры бьефов ограничивают нахождение допустимого количества судов. Предполагается, что в каждом из бьефов может одновременно находиться не более двух судов, двигающихся в одном направлении (всего не более четырех судов в бьефе).

Таким образом, состояние участка канала определяется:

I) наличием судов в бьефах;

2) состоянием шлюзовых камер.

Оптимизация на рассматриваемом участке ВДСК является частью глобальной задачи – общей оптимизации по всему каналу.

Рассматривается работа выбранного участка канала за данное время $TK$.

В начальный момент времени считаются заданными:

I) дислокация флота на участке;

2) тип каждого судна;

3) максимальная допустимая скорость движения судна каждого типа по каждому бьефу;

4) время шлюзования судна каждого типа;

5) состояние шлюзовых камер.

Начальное состояние рассматриваемого участка канала определяется дислокацией флота и состоянием шлюзовых камер. Изменение этого состояния возможно только в моменты освобождения хотя бы одного из шлюзов. Эти моменты и являются моментами управления состоянием участка канала. При этом возможны, вообще говоря, следующие варианты решения:

I) введение в шлюзовую камеру первого судна со стороны открытых ворот;

2) введение второго судна;

3) наполнение (сброс) призмы – холостой ход при условии наличия встречных судов;

4) отсутствие подходящих судов – простой шлюза.

Время занятости шлюза в каждом из вариантов различно. Поэтому следующий момент управления одним и тем же шлюзом может наступить через разные промежутки времени.

Рассматриваемый промежуток времени $TK$ разбивается, таким образом, на части точками - моментами управления. Каждому варианту движения судов по участку канала соответствует тогда вариант разбиения отрезка времени $TK$ на части.

В промежуток времени между двумя моментами управления возможно только перемещение судов внутри бьефов в направлении к воротам шлюза. С точки зрения описываемой модели состояние участка канала не меняется - все три шлюзовые камеры заняты.

П. Определение оптимального варианта.

Рассматриваемая модель предполагает работу с различными критериями оптимальности. Это могут быть суммарные расходы по судам и шлюзам, суммарное время ожидания с учетом приоритета судна и груза, время прохождения канала и т.д. и т.п. В основе всех этих критериев лежит время простоя судов и шлюзов.

Рассматриваемый промежуток времени $TK$ работы участка канала разбивается на части - такты. Длительность такта является минимальным промежутком времени прогнозируемой занятости всех трех шлюзов. За время такта суда с максимальной допустимой скоростью перемещаются в бьефах к входным воротам следующего шлюза. Неиспользованное при этом время такта составляет время ожидания освобождения шлюза - штрафное время, определяющее значение штрафной функции.

По окончании такта хотя бы один из шлюзов освобождается. Появляется возможность либо ввести то или иное судно в камеру, либо произвести холостой ход. При выборе одного из этих трех вариантов дальнейшей работы данного шлюза вычис-

ляется прогнозируемое время его занятости: время шлюзования судна или время холостого хода. При этом время холостого хода считается штрафным.

Остальные шлюзы по окончании такта остаются занятыми, их время прогнозируемой занятости уменьшается на величину рассмотренного такта. Минимальное время прогнозируемой занятости шлюзов определит величину следующего такта.

Если шлюзовая камера за время такта остается свободной (простой или авария), то это время также считается штрафным.

Таким образом, штрафная функция определяется временем ожидания судов у ворот шлюзов, временем холостого хода камер, временем их простоя или аварийной остановки. Каждому варианту решения в моменты управления соответствует разбиение рассматриваемого промежутка времени $TK$ на части-такты, что определяет то или иное значение штрафной функции.

Оптимальным считается вариант с минимальным значением штрафной функции.

Ш. Алгоритм выбора оптимального варианта.

Каждое судно на рассматриваемом участке канала описывается четырьмя параметрами: имя, пространственная координата, направление движения, тип.

Максимальная скорость движения судна зависит от номера бьефа и от типа судна.

Время шлюзования судна зависит от его типа.

Состояние шлюзовой камеры описывается одним параметром, принимающим следующие значения:

а) - I - шлюзовая камера свободна и готова принять

судно, идущее с Волги;

б) I – шлюзовая камера свободна и готова принять судно, идущее с Дона;

в) 0 – шлюзовая камера занята;

г) 2 – аварийное закрытие шлюза.

В начальный момент времени задается дислокация флота на участке, состояние шлюзовых камер, прогнозируемое время занятости шлюзов.

Если какой-либо из шлюзов оказывается свободным, то выбирается один из возможных вариантов дальнейшей работы, определяется прогнозируемое время выполнения этой работы, т.е. прогнозируемое время занятости шлюза.

Минимальное время занятости шлюзов определяет длительность такта (время общей занятости шлюзов).

Момент времени окончания такта является начальным для нахождения следующего такта (рис.I).

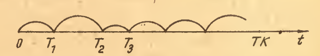



Рис.I. Разбиение отрезка $TK$ моментами управления

Если момент времени окончания очередного такта становится больше заданного $TK$ , то заканчивается построение одного варианта судопропуска на рассматриваемом участке канала. При этом значение штрафной функции складывается из значений ее на каждом такте.

Если моменты управления (моменты освобождения шлюзов) считать вершинами графа, а длительности тактов – его ребра-

ми, то одному варианту судопропуска по данному участку канала будет соответствовать одна траектория полного графа. Задача отыскания оптимального варианта работы участка канала за данное время сводится, таким образом, к задаче нахождения оптимальной траектории.

Алгоритм поиска оптимальной траектории состоит в следующем. Первая построенная траектория (рис.2, сплошная линия) считается базовой и запоминается. Каждая следующая траектория строится из предыдущей выбором другого варианта построения последнего такта (делается шаг назад по траектории). Длительность нового последнего такта может быть другой, и потому траектория может иметь продолжение (см.рис.2, пунктирная линия). Если все варианты построения последнего такта очередной траектории исчерпаны (см.рис.2, двойная линия), то делается еще шаг назад, т.е. рассматривается новый вариант построения предпоследнего такта (см.рис.2,волнистая линия).



Рис.2. Построение графа вариантов судопропуска

Перебор продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все варианты построения первого такта, т.е. возвращаемся к начальному моменту управления.

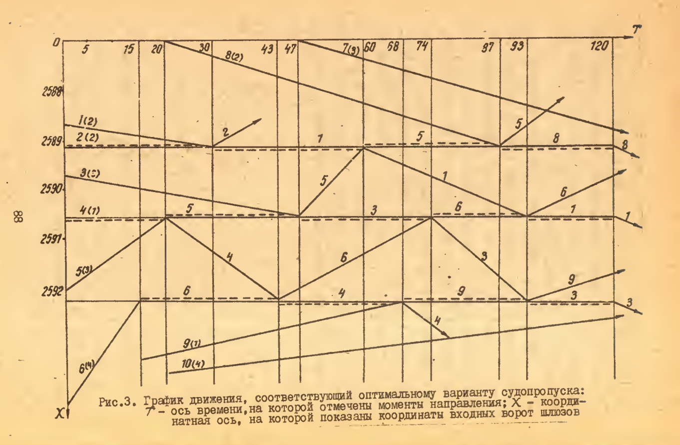



Рис.3. График движения, соответствующий оптимальному варианту судопропуска: $T$ - ось времени, на которой отмечены моменты направления; $X$ - координатная ось, на которой показаны координаты входных ворот шлюзов

Если штрафная функция имеет на новой траектории меньшее значение, то она запоминается как оптимальная. Если же значения штрафной функции на двух траекториях совпадают, то оптимальной считается траектория с большим числом вершин.

Таким образом, описанный выше алгоритм перебирает все возможные траектории графа и выдает в качестве конечного результата оптимальную траекторию, соответствующую минимуму заданной штрафной функции.

Полученная оптимальная траектория и определяет оптимальный режим работы рассматриваемого участка канала за рассматриваемое время.

IУ. Пример.

В начальный момент времени на рассматриваемом участке канала находится 6 судов, дислокация которых указана на графике (рис.3) оптимального планируемого движения. Приоритет судов указан в скобках рядом с номером судна. Третий шлюз свободен и готов принять судно, идущее с Волги. В течение времени исследования ( $TK$ = I20 мин) в участок входит еще 4 судна.

В качестве критерия оптимальности рассматривалась функция, представляющая собой сумму времени простоев шлюзов за прогнозируемое время, времени "холостого хода" шлюзов и времени ожидания судов, отнесенных к их приоритету.

Приведенный на рис.3 график оптимального варианта судопропуска получен по изложенному выше алгоритму с помощью ЭВМ ЕС-I022.

Литература

I. Белых В.Н., Кожухарь В.И. Об одном из

возможных вариантов оптимизации судопропуска на шлюзованных системах.- Тр./ГИИВТ, вып.219, 1986, с.3-14.

2. П ь я н ы х С.М. Расчет продолжительности группового шлюзования и пропускной способности шлюза.- Тр./ГИИВТ, 1965, вып.70, с.112-125.

3. П ь я н ы х С.М. Ускорение пропуска судов через шлюзы./ Произв.-техн.сборник ТУ МРФ, № 4.- М.: Транспорт, 1965, с.15-17.

4. П ь я н ы х С.М. Методика нормирования затрат времени судами при прохождении шлюзов.- Тр./ ГИИВТ, 1972, вып. 117, ч.2, с.100-116.

5. Определение целесообразности и состава АСУ "Канал" как подсистемы АСУ "Речфлот".- Ленинград, 1980. - 125 с.

УДК 629.124.9.011.17-112

Пути улучшения поворотливости существующих катамаранных судов внутреннего плавания. Б о н д а р ч и к В.М. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.3-7.

На основании натурных испытаний катамаранов и выполненных расчетов показано, что построенные суда катамаранного типа внутреннего плавания не удовлетворяют действующим нормам управляемости. Даны практические рекомендации для улучшения параметров поворотливости судов данного типа. Табл.2.

УДК 629.12:532.5

Анализ методов определения гидродинамических характеристик корпусов судов. К у ш н а р е в Ю.М., Т о к а р е в П.Н. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.8-18.

Дается общий анализ методов определения гидравлических характеристик (ГДХ) судов и толкаемых составов, используемых в настоящее время в расчетах управляемости и параметрах маневрирования. В результате анализа делается вывод о том, что расчет таких важных с точки зрения обеспечения безопасности плавания маневров, связанных с применением подруливающих устройств и работы движителей "враздрай", невозможен ввиду отсутствия метода определения ГДХ речных судов для $\beta > 30$ град и $\omega > 1,3$. Возможность применения метода А.П.Тумашика для этих целей требует экспериментальной проверки. Ил.4, библ.14.

УДК 629.12:532.5

Определение гидродинамических усилий, возникающих на корпусе грузового судна при произвольном плоском движении. Т о к а р е в П.Н. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.19-26.

Приведены зависимости, позволяющие вести расчет гидродинамических усилий, возникающих на корпусе грузового судна внутреннего плавания при изменении углов дрейфа от 0 до 180 град и радиуса кривизны траектории движения центра масс судна от 0 до $\infty$. Позиционные составляющие гидродинамических усилий определяются по выражениям, полученным на основе проводимых испытаний серии моделей грузовых судов в прямом опытовом бассейне НИИВТа в марте 1986 г. Ил.2, библ.2.

УДК 656.62.052.4

Исследование управления судном при переходе с прямого курса на поворот заданного радиуса. Т и х о н о в В.И. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.27-47.

На основе исследований В.Г.Павленко и Л.М.Витавера составлена частная математическая модель неустановившегося движения судна на повороте реки. Изложен метод определения параметров управления судном при переводе его с прямого курса на поворот (характера перекладки руля и дистанции упреждения начала маневрирования). Приведены данные по проверке расчетных значений параметров управления в натурных условиях. Табл.I, ил.2, библ.I4.

УДК 656.62.052.4

Определение параметров управления судном при переходе с поворота заданного радиуса на прямой курс. Т и х о н о в В.И. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.48-55.

Изложен метод определения параметров управления судном (характера перекладки рулевого органа и угла упреждения начала одерживания) при переводе его с поворота на прямой курс. Приведены данные по проверке расчетных значений параметров управления в натурных условиях, а также результаты экспериментальных радиолокационных проводок судов по криволинейному речному участку "расчетным" методом. Табл.I, ил.I, библ.2.

УДК 62I.396.967.656.62.053

Радиолокационная проводка на прямолинейных участках пути с латеральной системой навигационного оборудования. Г о л у б е в А.И. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.56-67.

Изложена методика определения чувствительности радиолокационной ориентировки судоводителя на прямолинейных участках пути с латеральной системой навигационного оборудования. Дан расчет габаритной ширины полосы радиолокационной проводки одиночного судна при латеральной системе навигационного оборудования на прямолинейных участках пути. Табл.2, ил.2, библ.4.

УДК 627.913

Метод обоснования оптимальной частоты расстановки знаков при осевой системе. С а м о г и н Б.А., Х о х л о в В.А.- "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.68-72.

Предложен метод определения оптимальной частоты расстановки плавучих навигационных знаков при осевой обстановке. Ил.2.

УДК 658.012.011.56

Основные технические решения при проектировании и разработке АСУ ТП "Канал". К у л и к о в а Н.Л., Л о с к у т о в В.Д., К у п ц о в Ю.Б. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях".ГИИВТ, 1987, с.73-80.

Предложен вариант структуры комплекса технических средств (КТС) АСУ ТП "Канал", реализующий сбор и обработку информации об объектах управления, формирования и выдачу управляющих воздействий. КТС организован по иерархическому принципу и состоит из технических средств управления процессом шлюзования; определения местонахождения и технологического состояния судна; сбора, обработки и передачи данных; средств отображения информации о технологическом процессе судопропуска. Ил.I.

УДК 658.012.011.56:656.62

Оптимизация режима работы участка канала, содержащего три шлюза. Щ у к с С.Д., Э х о в а С.М. - "Вопросы повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях". ГИИВТ, 1987, с.81-90.

Рассматривается задача отыскания оптимального судопропуска через три шлюза Волжского склона Волго-Донского канала. Приводится алгоритм выбора оптимального режима участка канала. Ил.3, библ.5.

# СОДЕРЖАНИЕ

Сводный тематический план, 1987, поз.42

ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА
НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

Редактор И.И.Соина
Худож.редактор Л.С.Гачева
Техн.редактор Л.В.Галактионова

Подписано в печать 19.II.87 г. . МЦ 00338.
Формат бумаги 60x84 $\frac{1}{16}$ . Газетная
Офсетная печать. Печ.л. 4,5. Уч.-изд. 4,3.
Тираж 300 экз. Заказ № 510 . Цена 45 коп.

603600, г.Горький, ул.Нестерова, 5
Типография ГИИВТа

Цена 45 коп.